DIALOGO: CIENCIA Y TEOLOGIA



JUNIO 2006
6,00 EUROS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Computación con nudos cuánticos

¿POR QUÉ SON TAN INTELIGENTES ALGUNOS ANIMALES?

LA ENERGIA FANTASMA Y EL FUTURO DEL UNIVERSO

GLOBALIZACION Y POBREZA

VACUNAS CONTRA LOS ROTAVIRUS





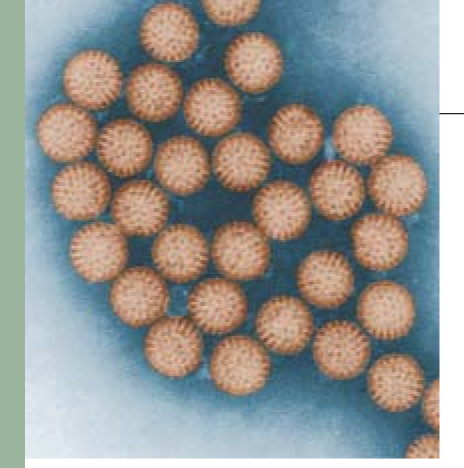
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Junio de 2006

Número 357

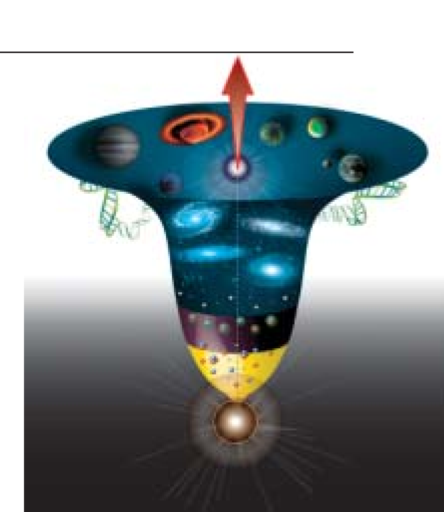














DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

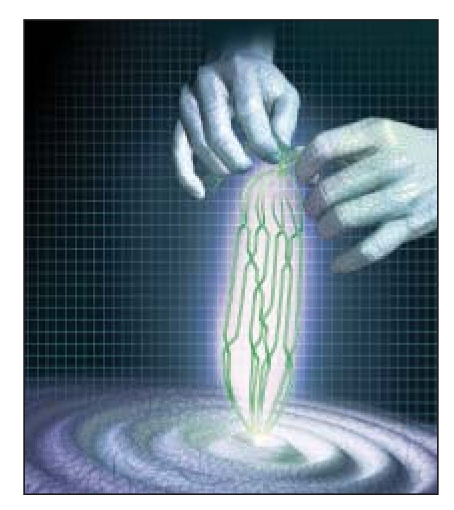
Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Manuel González Mañas: *Vacunas contra los rotavirus*; Luis Bou: *Computación con nudos cuánticos*, *Hacia el rozamiento cero*; Joandomènec Ros: *¿Por qué son tan inteligentes algunos animales?*; J. Vilardell: *Globalización y pobreza*, *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; I. Nadal: *Diálogo*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; M.ª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada


ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

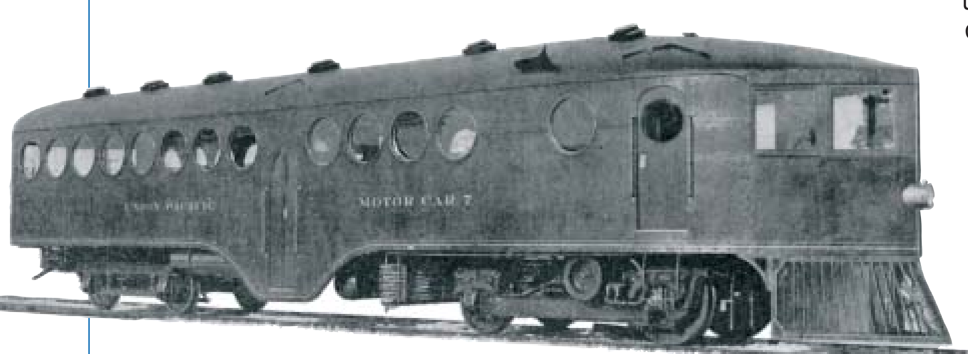
EL ANTIPROTÓN. «Desde que se evidenció que la creación de un antiprotón requiere una energía enorme, los rayos cósmicos se convirtieron en el lugar más indicado para encontrarlos. En contadas ocasiones hallaron los investigadores algo que pareciera señalar la generación de un antiprotón, pero nunca con información suficiente para identificarlo con certeza. Cuando el Bevatrón de la Universidad de California empezó a bombardear con protones de 6 GeV (1 gigaelectronvolt, mil millones de electronvolt) un blanco de cobre, el problema siguiente fue detectar e identificar los antiprotones resultantes. Owen Chamberlain, Thomas Ypsilantis y los autores de este artículo elaboramos un plan para ello. En Berkeley, ya se han detectado, en emulsiones, trazas de unos 20 antiprotones. —Emilio Segrè y Clyde E. Wiegland» [*Nota de la redacción: Emilio Segrè ganó el premio Nobel de física en 1959*.]

MAÍZ POLÍTICAMENTE CORRECTO. «El reinado personal de Trofim Lysenko sobre la genética de la URSS llegó a su fin en abril con su dimisión como director de la Academia de Ciencias Agrícolas de la Unión. Ello da a entender que, tras considerarse durante 15 años una rama de la ciencia políticamente desacreditada, la genética de Mendel vuelve a aceptarse en la Unión Soviética. En los campos soviéticos ya se está plantando maíz híbrido, incompatible con las teorías de Lysenko sobre las características adquiridas. La semana antes de que Lysenko desapareciera de la luz pública, se anunciaba en Moscú la publicación inminente de las investigaciones de Nikolai Vavilov, genetista de fama internacional que se opuso al ascenso de Lysenko. Vavilov murió en 1942 deportado a Siberia.»

...cien años

ALIMENTOS EN CONDICIONES. «El descubrimiento de los métodos antihigiénicos que se aplican en las plantas de envasado del Oeste, recientemente sometidos a la atención del presidente [Theodore Roosevelt] y a los que ahora se pretende que ponga coto y remedio una inspección oficial especial, tal como se prevé en la enmienda Beveridge del proyecto de ley de Asignaciones Agrícolas, tendrá como consecuencia que la preparación de productos inadecuados para el consumo humano se someterá a controles sanitarios. Parece haberse perdido de vista el hecho de que la ley cubre sólo una parte reducida de nuestros alimentos. Lo que es cierto para los productos cárnicos derivados del vacuno, ovino, cabrito y porcino (sobre todo carnes y mantecas enlatadas y preparadas) es por igual aplicable a una extensa variedad de otros productos, tales como aves, caza, pescado y huevos» [*Nota de la redacción: Ese intento se debió en gran medida a la influencia del libro de Upton Sinclair* La jungla*, publicado en 1906*.]

LA MÁQUINA N.º 7. «La ilustración muestra el último modelo de coche automotor de gasolina de la Union Pacific, construido para tráfico urbano y para servicios de inspección en las líneas de esa compañía. La máquina n.º 7 se ha fabricado en los talleres de Omaha (Nebraska) de Union Pacific Railroad; en fecha reciente ha superado con éxito una serie de pruebas entre esa ciudad y Grand Island. Entre los rasgos más destacados del modelo están las ventanillas tipo ojo de buey, el afilado tope delantero y los cómodos accesos de entrada. La propulsión se debe a un motor de gasolina de seis cilindros montado sobre los bojes delanteros.»



Coche automotor n.º 7, Union Pacific Railroad, 1906.

...ciento cincuenta años

LA PRIMERA FOTOGRAFÍA SUBACUÁTICA. «W. Thompson, de Weymouth (Inglaterra), da cuenta, en *Journal of the Society of Arts*, de los medios de que se valió para tomar una fotografía del fondo marino, en la bahía de Weymouth, a una profundidad de tres brazas. Parece que la cámara la introdujo en una caja, cuyo frente era una hoja de vidrio, con un disparador alargable que se quedaba arriba mientras la caja se hundía. Cuando ésta llegaba al fondo, se exponía la placa durante unos diez minutos. Seguidamente se izaba la caja a la embarcación y la imagen se revelaba del modo usual. Así se consiguió una imagen de las rocas y algas del fondo de la bahía. Prevé el señor Thompson que éste podría constituir un método sencillo y barato para conocer el estado de muelles, puentes, pilares, estructuras y cimentaciones subacuáticas.»

CAMELLOS TEJANOS. «Los camellos árabes por los que el gobierno envió al Mediterráneo una expedición oficial han llegado a la bahía de Matagorda, en Texas. Se emplearán como medio de transporte en los desiertos del oeste de nuestro país.»

APUNTES

BIOINGENIERIA

Electrodo vírico

Las baterías de iones de litio tradicionales tienen unos electrodos de carbono demasiado gruesos para la energía que proporcionan. Para adelgazarlos, se ha recurrido a uno de los paradigmas del autoensamblado, los virus. Un equipo del Instituto de Tecnología de Massachusetts ha diseñado un virus tubular de gran longitud, de nombre M13; forma una cápside proteínica que se adhiere vigorosamente a los átomos de cobalto y de oro. Para ello, sumergieron una película de electrolito polimérico en una solución con el virus y luego en una solución con los átomos metálicos; consiguieron así una lámina transparente revestida de óxido de cobalto y oro. El resultado, un electrodo positivo, almacena tres veces más energía que su pariente de carbono. El siguiente objetivo consiste en formar un electrodo negativo y, finalmente, una batería autoensamblada.

—J. R. Minkel

CONSERVACION DE ALIMENTOS

¿Cómo impiden la sal y el azúcar la descomposición microbiana?

La sal (normalmente, cloruro sódico) y el azúcar (por lo general, sacarosa) dificultan de diversas formas el crecimiento microbiano e impiden así la descomposición de los alimentos. Entre ellas, la más notable es la simple ósmosis, que produce deshidratación. La sal o el azúcar, sea en forma sólida o en solución, tratan de alcanzar un equilibrio con el contenido de sal o de azúcar del producto alimenticio con el que están en contacto. La consecuencia es la extracción de agua existente en el interior del alimento y la introducción de moléculas de sal o azúcar en su interior. De ahí resulta una reducción de la actividad acuosa (a_a), una medida de la proporción de las moléculas de agua sin ligar, necesarias para que los microorganismos sobrevivan y se reproduzcan. El valor de a_a de la mayoría de los alimentos frescos es 0,99 y el valor de a_a necesario para detener el crecimiento de casi todas las bacterias es, aproximadamente, 0,91. Las levaduras y los mohos sobreviven aún con valores menores. Los microorganismos divergen entre sí en su capacidad de resistir las reducciones de contenido acuoso por efecto de la sal o el azúcar. La mayoría de las bacterias patógenas dejan de multiplicarse por debajo de a_w = 0,94 (concentraciones de cloruro sódico en torno al 10 por ciento), mientras que la mayoría de los mohos que estropean los alimentos medran todavía con valores de 0,80, que corresponde a disoluciones concentradas de sal o de azúcar. La sal y el azúcar, además de deshidratar los alimentos, obstaculizan la actividad enzimática de los microorganismos y debilitan la estructura molecular de su ADN. El azúcar puede ocasionar también una forma indirecta de conservación, ya que puede acelerar la acumulación de compuestos antimicrobianos procedentes del aumento de otros microorganismos. Son ejemplos al caso la conversión de azúcar en etanol en el vino por las levaduras de las fermentaciones y la transformación de azúcar en ácidos orgánicos en la *choucroute* (col ácida) por bacterias que producen ácido láctico.



—Mickey Parish
Depto. Ciencias de la Nutrición y Alimentación
Universidad de Maryland

EVOLUCION

Como pez fuera del agua

El descubrimiento en las zonas árticas canadienses de unos fósiles de peces con aletas similares a extremidades se ha interpretado como el hallazgo de un eslabón perdido en la evolución de los animales desde el agua a tierra firme. Los tres especímenes casi completos de un pez aplanado con hechuras de caimán, al que se ha dado el nombre de *Tiktaalik roseae,* poseen las escamas, las aletas, el hocico y la mandíbula inferior de un pez, y las vértebras, el cuello, el cráneo, las muñecas y los huesos digitales de un animal terrestre. Los fósiles, de hasta tres metros de longitud, fueron desenterrados de rocas cubiertas de hielo en una zona de osos polares, pero hace unos 375 millones de años, cuando vivieron aquellos peces, la tundra se asemejaba a una versión subtropical del actual delta del Mississippi. Las costillas traslapadas de aquel depredador de dientes afilados componían un tronco rígido impropio de los peces que flotan en el agua; debió de vivir en los bajíos, quizá con excursiones a tierra.

—Charles Q. Choi



El eslabón perdido. El tiktaalik llena un vacío entre los animales acuáticos y los terrestres.

MATT COLLINS (*arriba*); UNIVERSIDAD DE CHICAGO (*abajo*)

SALUD

La guerra de los estudios

Ultimamente, se extiende la confusión acerca de los supuestos beneficios de ciertos alimentos. Los estudios contradictorios, y los estudios de los estudios, se acumulan; resultados que parecían firmes quedan en entredicho. Al revisarse 54 estudios que al parecer demostraban que beber con moderación palia las enfermedades cardíacas, se ha visto que la mayoría de ellos juntaba abstemios con ex bebedores; como algunos de estos quizá dejasen de beber tras enfermar, rebajan la media de salud del grupo. En los siete estudios en que abstemios y ex bebedores estaban separados, no se hallaron los efectos protectores del alcohol. Y cuando se reorganizaron los datos publicados de los estudios que combinaban abstemios y ex bebedores, se esfumaron los efectos protectores. Sin embargo, los puros datos fisiológicos dan a entender que el alcohol podría tener, pese a todo, algún efecto beneficioso, como subraya una de las autoras de la revisión.

—J. R. Minkel



Más confusión estadística: ahora ponen en entredicho que el consumo moderado de alcohol proteja el corazón.

SIDA

El fracaso de "tres para el cinco"

El programa "3 para el 5" de Onusida y la Organización Mundial de la Salud pretendía que se atendiera en los países pobres y medianos a tres millones de enfermos de sida con antirretrovirales para finales de 2005 (de los seis millones y medio, de infectados con HIV que los necesitaban en esas naciones). En marzo de 2006 publicaban esos organismos de las Naciones Unidas su informe acerca de "3 para el 5": en diciembre de 2005 recibían antirretrovirales, en esos países, sólo alrededor de 1.300.000 personas (por unas 700.000 en 2004). El precio medio anual, en los países pobres, del tratamiento de "primera línea" era en 2005 de 268 dólares. El de segunda línea (las opciones a que se recurre cuando falla el tratamiento de primera línea) no ha descendido en la misma medida: en Costa de Marfil, por ejemplo, cuesta 1700 dólares, y 6788 en Panamá. La financiación internacional no cubre lo que les falta a los individuos y naciones pobres para costearse la medicación. Según Onusida, la diferencia entre el gasto necesario para luchar contra el sida y los fondos disponibles entre 2005 y 2007 será de 18.000 millones de dólares (alrededor de una diezmilésima del producto bruto del mundo —medido en paridad de poder adquisitivo— durante ese período, una mitad del cual, más o menos, corresponde a las naciones desarrolladas). A lo largo de 2006 se dispondrá de unos 9000 millones de dólares. Sin un cambio radical, la falta de recursos no dejará de crecer, con la consiguiente pérdida de millones de vidas: sólo en 2008, se necesitarán unos 22.000 millones de dólares. Téngase en cuenta que, pese a las dudas que algunos expresaban, el tratamiento con antirretrovirales, cuando llega a aplicarse, tiene el mismo éxito en los países pobres que en los ricos: el 93 por ciento de los medicados en Sudáfrica siguen vivos un año después, y la mayoría de los que murieron pertenecían al grupo de los que no recibieron a tiempo el tratamiento.

CLIMA

Venecia y el cielo de Islandia



Venecia y su laguna, fotografiadas por el satélite Terra de la NASA.

Las recurrentes inundaciones de la laguna de Venecia dependen de la presión atmosférica en Islandia. Lo ha descubierto un grupo de investigadores venecianos. En concreto, han observado su estrecha dependencia de la Oscilación del Atlántico Norte, fenómeno similar a El Niño pero centrado sobre el océano glacial Artico. Consiste en una determinada configuración de la presión atmosférica entre Islandia y las Azores, con una fluctuación repetida; en los últimos decenios ha causado otoños lluviosos en Europa. La Oscilación llega a subir 20 centímetros el nivel de las mareas venecianas, por medio de su influencia en la dirección de los vientos y la magnitud de las precipitaciones. Es un efecto de magnitud tal, que enmascara el del hundimiento natural o artificial de la laguna o los cambios debidos al aumento global de la temperatura. La interacción entre el viento solar y el campo magnético terrestre actúa sobre la formación de nubes y la periodicidad de la Oscilación. Habida cuenta de los ciclos solares, los investigadores predicen una subida del nivel del agua excepcional en el invierno de 2006 y en el de 2040. Advierten también de que el proyecto Moisés, unas compuertas que protegerían la ciudad de las mareas, sería sólo una solución parcial: los ecosistemas más delicados de la laguna seguirían amenazados por los niveles estacionales del agua.

—Jacopo Pasotti

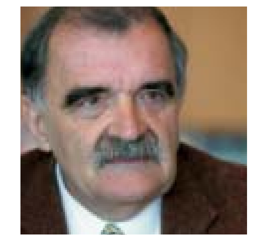
PHOTOCUISINE/*CORBIS* (*arriba*); CORTESIA DE NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS, Y U.S./JAPAN ASTER SCIENCE TEAM (*abajo*)

Ciencia y Teología

El cosmólogo Gerhard Börner y el teólogo católico Hans Küng dialogan con Reinhard Breuer y Götz Hoeppe, director y redactor, respectivamente, de *Spektrum der Wissenschaft*, la edición alemana de *Scientific American*, sobre las relaciones entre ciencia y teología.

Spektrum: Profesor Küng, ¿cómo se encuentra hoy la relación de la teología con las ciencias naturales?
Küng: Vista en conjunto, la relación de la Iglesia con la física es hasta cierto punto distendida. Es más delicada con la biología, y aún más difícil en ciertas cuestiones de psicología e investigación del cerebro.
Spektrum: Profesor Börner, ¿son ciencia y teología niveles totalmente diferenciados, para los cuales lo mejor es mantenerse alejados entre sí?
Börner: Preferiría decir que ciencia y teología abordan esferas distintas de la realidad. Hay una esfera donde la ciencia es competente. Está restringida a la objetivación. Acepto que hay un mundo real, que está frente a mí. Se prescinde del sujeto, del que se ocupa la religión; en la física no figura. Sobre si aparece en alguna otra parte, la física tampoco tiene nada que decir.
Spektrum: ¿Es nítida o imprecisa esta separación?
Küng: En cualquier caso se ha de considerar como una cuestión de principio. Hay temas en los que la religión sencillamente no es competente, así la manera en que se constituyó el cosmos. Pero lo mismo vale a la inversa, en lo que toca al origen mismo, el sentido originario de todo, las normas éticas, nuestra patria espiritual. Este es sólo un aspecto. En ambos lados hay innumerables cuestiones que obligan a cada disciplina a ponerse al día con la otra.
Spektrum: ¿Es uno de estos temas la creación, que usted trata con detalle en su libro *Der Anfang aller Dinge* ("El principio de todas las cosas")? ¿Aborda mejor la religión esta cuestión, donde la física topa con sus límites?
Küng: Admiro lo mucho que se ha profundizado en cosmología desde Copérnico y Galileo. Tengo curiosidad y quisiera saber cómo se desarrolla. Es independiente de mi fe, que se remonta a otra fuente. Pero me pregunto también cómo se relacionan los sucesos de los "tres primeros minutos" con el relato bíblico de la creación en los primeros siete días.
Spektrum: ¿No se trataría de una teoría para tapar los agujeros, la búsqueda de un Dios en los resquicios que la ciencia no pueda llenar?
Küng: La teología ilustrada ha aprendido, a buen seguro, de los muchos errores de los teólogos y de la Iglesia en el pasado. Una batalla tras otra en retirada. Siempre existe el riesgo de que se tapen esos agujeros y haya que seguir retrocediendo a zonas cada vez más reducidas. De ahí las connotaciones negativas de un Dios que tapa los agujeros.
Börner: Yo también tengo la impresión de que la mayoría de los teólogos considera mala teología colocar a Dios en las lagunas de las ciencias de la naturaleza. De ahí que me parezca tan interesante el origen del cosmos y el relato de la creación: es un punto de encuentro de ambas disciplinas.
Spektrum: ¿Cómo?
Börner: Dicho de la manera más llana: la religión habla de la visión del mundo, de la humanidad y del lugar del ser humano en el mundo. La visión científica del mundo ha de tener todo esto en cuenta.

Küng: Estos contactos se dan. Pero proyectos como la búsqueda, quizá vana, de la fórmula del mundo son propiamente cuestiones de la arquitectura intramundana; otras son las que a la religión le interesan. En el origen primerísimo del espacio y el tiempo la física ya no es competente.
Spektrum: Doctor Börner, ¿es así?
Börner: Los modelos del cosmos son sumamente sencillos. El modelo de la gran explosión explica con precisa exactitud las observaciones astronómicas. Pero con una extraña característica: una singularidad en el pasado, el comienzo del tiempo. Establece ahí los límites de su propia validez y del alcance de la teoría de la gravitación. Confiamos, no obstante, en que una asociación de la teoría de la gravitación y la física cuántica nos explique un día ese estado inicial.



El modelo de la gran explosión es una teoría que establece sus propios límites

MANFRED GROHE/*Spektrum der Wissenschaft*

Spektrum: ¿Y qué espera usted que se diga entonces a propósito del tiempo?
Börner: El tiempo no estaba dado al principio tan absolutamente como en nuestra vida cotidiana. El tiempo se origina en la gran explosión junto con el espacio. La idea anda cerca de algunas reflexiones teológicas, por ejemplo las de Agustín. Decía que Dios, al crear el mundo, no se encontraba en el tiempo, sino fuera del espacio y el tiempo.
Spektrum: ¿Qué concepciones científicas de la creación deberían tener en cuenta los teólogos, y viceversa?
Küng: También a mí me parece el modelo de la gran explosión un logro grandioso, porque tiene un sólido fundamento empírico.



MANFRED GROHE/*Spektrum der Wissenschaft*

1. Diálogo crítico con café y pastas: Hans Küng y Gerhard Börner con los redactores de *Spektrum* Reinhard Breuer y Götz Hoeppe (*de izquierda a derecha*).

Börner: Pero en los límites señalados, donde queda autoconfinado.
Küng: En este momento no me interesan los límites intracósmicos, que la física puede y debe seguir ensanchando. Me importa ese "andar cerca" de que usted habla. Para Leibniz, la cuestión fundamental de la filosofía era: ¿por qué existe algo en vez de nada? ¿Por qué se dio una gran explosión en vez de ninguna?
Spektrum: ¿Tiene algún sentido esta pregunta?
Börner: Es realmente difícil dar un sentido a esta pregunta desde la física. Pues, evidentemente, nosotros partimos de lo que nos es dado, de lo que está ahí, de lo factual. La pregunta por la causa de que se diera esta gran explosión transciende la física. Queda un resto inexplicable.
Spektrum: ¿Va más lejos la religión?
Küng: No es en absoluto mi intención abordar una prueba de la existencia de Dios. La mayoría de los científicos y los teólogos están de acuerdo con Kant, quien decía que las cuestiones que están fuera del espacio y tiempo transcienden el horizonte de nuestra experiencia.
Spektrum: ¿De qué hablamos, pues?
Küng: La razón teórica "pura", como la llama Kant, no es competente en cuestiones transempíricas, sino la razón práctica; por eso prefiero hablar de confianza razonable. Nos situamos aquí ante planteamientos netamente religiosos.
Börner: El modelo cósmico nos muestra muy claramente la limitación a que estamos sujetos. Los científicos pueden ordenar el mundo sólo en el espacio y tiempo. Pero cabe contemplar la posibilidad de que existan otras ordenaciones, que no captamos con los métodos científicos. Lo creo esencial, porque elimina obstáculos que, en caso contrario, se levantarían ante las concepciones religiosas.
Küng: Me alegra. Pues algunos de sus colegas se declaran materialistas y sólo hablan de la religión en un tono irónico. También los científicos deberían hablar de religión con tanta información como yo, teólogo, lo hago sobre la ciencia.
Spektrum: Ustedes dos utilizan con frecuencia metáforas, a veces las mismas palabras, pero, que por lo visto, tienen significados muy distintos. Hasta a cosmólogos como Stephen Hawking les gusta mencionar a Dios. ¿Qué función desempeña el lenguaje en el diálogo entre ciencia y religión?
Börner: En los libros de divulgación es una especie de deporte. Se intenta desarrollar una imagen del mundo que lo abarque todo. Es lógico que se utilicen conceptos teológicos. Pero carece de un significado más profundo. Cuando Hawking dice que Dios ahora ya no es necesario, porque ha encontrado unas condiciones iniciales que no requieren una gran explosión, no hay que tomarlo realmente en serio.
Küng: Estoy de acuerdo. Sólo que muchos caen en la trampa, porque los científicos hacen uso, en este caso, de la autoridad de su especialidad para improvisar afirmaciones teológicas, filosóficas o éticas. Afortunadamente, Hawking ha rectificado no hace mucho.
Börner: Tienta transgredir las fronteras; es humano. En cualquier caso, no se deberían considerar tan absolutas esas fronteras, como si no pudieran hablarse los unos con los otros porque el lenguaje fuese muy diferente o los conceptos no encajaran. En este punto se pueden hacer progresos dialogando, como estamos haciendo aquí.

Spektrum: ¿Cree posible que algunos conceptos de la física pueden ser útiles también en la teología?
Küng: Pongamos un ejemplo. Me interesa, por supuesto, lo que dice la física sobre la luz (un ente que es a la vez onda y partícula, es decir, que tiene características complementarias). Mas esto no excluye que también yo use 'luz' como metáfora en la religión. Se adecua para una descripción plástica de atributos divinos complementarios, como la justicia y la compasión.



La noción de "luz" se presta a describir gráficamente las propiedades complementarias de Dios

Börner: Yo daría un paso más. La física moderna nos muestra un mundo más singular que el de la imagen mecanicista del siglo XIX. La realidad que se ve en ella está muy lejos del racionalismo ingenuo que dimana de las experiencias cotidianas.
Spektrum: ¿Usted también tiene un ejemplo?
Börner: Sigamos con la luz. Nos hemos acostumbrado a la idea de onda, pero no por ello deja de ser muy peculiar: una pura forma, que actúa sobre las partículas materiales pero puede propagarse por el espacio y el tiempo sin un medio material. Por otra parte, la luz consta de cuantos de luz o fotones. El tiempo que transcurre para estas partículas luminosas es igual a cero; para ellas no pasa el tiempo. Fueron emitidas hace miles de millones de años en una galaxia lejana y captadas después aquí con un telescopio. Pero estas partículas que se mueven a la velocidad de la luz no tienen tiempo propio, como decimos en física. Para ellas todo ocurre simultáneamente, están siempre en el presente. Lo que no está afectado de materia, no experimenta el tiempo. Me parece estupefaciente.
Spektrum: ¿Y qué tiene que ver con la religión?
Börner: Directamente, quizá nada. Pero hay ahora en la física moderna conceptos que muy bien se podrían emplear como metáforas en la teología; es el caso de la ya mencionada complementariedad. Hay objetos que son a un tiempo onda y partícula, que tienen, por tanto, propiedades contrarias. Incluso en este mundo limitado de la física, se dan cosas así de singulares.
Küng: Me agrada que la física también trabaje con metáforas. Por ejemplo, al tratar de las partículas más pequeñas, los quarks, es notorio que sólo se puede hablar de ellas con metáforas o fórmulas matemáticas.
Spektrum: ¿Cómo abordan ustedes, en su calidad de teólogo y de cosmólogo, la realidad?
Börner: En la física, como paradigma de las ciencias de la naturaleza, pretendemos descubrir algo sobre el mundo con el que nos encontramos mediante la formulación de teorías y la realización de experimentos. Las predicciones ni siquiera son lo más importante. Sobre todo se aspira a una orientación y a hallar nexos.
Spektrum: Señor Küng, ¿no aspira acaso la religión a lo mismo?
Küng: A los teólogos nos incumben la orientación fundamental y los nexos globales. La metodología es radicalmente diferente. Partimos siempre de un núcleo central, el mensaje religioso, la revelación. El teólogo contempla la realidad desde ese centro, y, con todo, es el mismo mundo que el físico ve ante sí. Por eso los teólogos deberían tomar buena nota de lo que investiga la ciencia.
Spektrum: A diferencia de la física, la religión sí se cree en posesión de la verdad.
Küng: Evidentemente, sería peligroso decir que los teólogos poseen la verdad. Pueden aproximarse a la verdad. Cuando trata de la verdad última, la verdad de Dios, también la teología topa con sus límites.
Börner: En la física, las hipótesis que se hacen están sujetas a la experimentación. Si ésta lleva a contradicciones, sustituyen a esas hipótesis otras nuevas. En la teología, determinados enunciados de fe sí deben considerarse irrenunciables, dogmas.
Küng: El primer artículo del credo dice: "Creo en un solo Dios, creador del cielo y de la tierra". Cierto que nosotros partimos de la revelación,



2. El teólogo católico Hans Küng es catedrático emérito de teología ecuménica en la Universidad de Tubinga y preside la fundación Etica Mundial. Es autor de numerosas publicaciones.

MANFRED GROHE/*Spektrum der Wissenschaft*

3. El cosmólogo y astrofísico Gerhard Börner es colaborador científico en el Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching y catedrático en la Universidad de Múnich.



MANFRED GROHE/*Spektrum der Wissenschaft*

al igual que un jurista parte de la constitución: no quiere redactar una nueva constitución, como tampoco el teólogo una nueva revelación. Pero si sólo se pudieran repetir tales dogmas y no cupiera inquirir e interpretarlos, entonces estaríamos ante un malentendido fundamentalista. Para comprender la ascensión de Cristo al cielo, no puedo partir de un concepto premoderno de cielo; o, en el contexto de la Navidad, hablar del nacimiento virginal con la simplicidad biológica de antaño.

Spektrum: Pero también la física tiene sus verdades absolutas. No se va a cambiar mañana la ley de la gravitación universal de Newton.

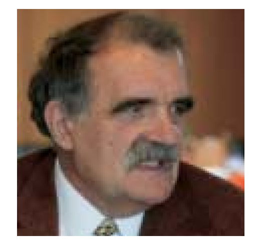
Börner: También en la física nos aproximamos a la verdad; las leyes de la naturaleza, no el hermoso mundo de los fenómenos, son lo absoluto. Nunca se ha de apelar a las explicaciones sobrenaturales. Con esta actitud se llega tan lejos como se pueda, que es asombrosamente lejos.

Küng: Cuando uno entra en el ámbito de lo metaempírico, se requiere cambiar por completo de modo de pensar. Si, pongamos por caso, digo que Dios es amor, entonces se ha de interpretar y caracterizar de nuevo el concepto de amor.

Börner: Físicos como Heisenberg, que eran también creyentes, buscaban un fondo originario de las leyes de la naturaleza como fundamento de todas ellas. Por supuesto sólo como extrapolación de reflexiones científicas, pero tengo la sensación de que así se llega a la teología.

Esto afecta a un punto muy fundamental. La física tiene una dificultad en su manera de abordar el mundo, a saber, la de considerarlo como algo objetivamente dado. Obtener una imagen comprensible sólo se logra al precio de dejar de lado a la persona, al sujeto, al yo. Por eso, en la visión científica del mundo hay tan poco lugar para Dios como para mi yo. El sujeto que me configura es quizá, según la neurología, un autoengaño. Pero si no es una ilusión, entonces debería tener una relación con lo que la religión designa con la palabra Dios.

Küng: Creo que yo me refiero a lo mismo que Heisenberg cuando hablaba de un fundamento originario. La diferencia surge cuando, por ejemplo, la Biblia habla de un Dios que actúa. Seguro que aquí tienen los científicos sus problemas. Nosotros no tratamos a toda costa de explicar los conceptos teológicos por medio de nociones científicas. Pero, a la inversa, un astronauta que lea la Biblia en una estación espacial quizá se pregunte por el sentido de todo, por el bien y el mal.



La física construye una visión inteligible del mundo a costa de prescindir del yo

Spektrum: Las preguntas por el sentido, ¿sólo se pueden contestar fuera de la ciencia? ¿La ciencia se ocupa de los hechos y la religión de sus significados?

Börner: Bien es verdad que se tiende a hablar así. Pero la ciencia esboza imágenes, por ejemplo, del ciclo cósmico: seríamos polvo estelar, con cada átomo de carbono de nuestro cuerpo producido en las estrellas. O la teoría de la evolución de Darwin, según la cual el ser humano es parte del desarrollo biológico. Estas imágenes proveen asimismo de significado a los seres humanos.

Küng: Desde luego, la teoría de la evolución consigue explicar, por ejemplo, por qué fue posible y tuvo sentido la formación del ojo. Para eso no se requiere sacar a colación ninguna intervención divina. Yo no sostengo que tan sólo la religión ofrece significados. La religión se ocupa de lo último y lo primero, del origen y sentido de todo, tanto del cosmos como del hombre.

Spektrum: En el caso de la gran explosión, cada vez es más raro manejar teorías físicas contrastables. ¿Cómo ven la función de la especulación en estas reflexiones?

Börner: Este modo de proceder especulativo no es más que el método

con el que se busca progresar. Al principio se tiene siempre una idea, que se contrastará experimentalmente. En cuanto a la gran explosión, se intenta concebir qué se sigue de la teoría de las cuerdas acerca del estado inicial. Se llega a un número de posibilidades elevadísimo; todas ellas pueden conducir a un universo propio. Si se logra identificar una de estas posibilidades con nuestro universo, con todas sus constantes y fuerzas fundamentales, sería un potente indicio de que se ha encontrado una verdad.

Küng: Son reflexiones legítimas, modelos matemáticos, pero no deberían confundirse con la realidad. ¿Sigue teniendo todo esto una fundamentación empírica?

Börner: El anclaje de estos modelos en la realidad es muy tenue. Pero incluso estas tesis osadas sirven para dar una orientación. Uno no debería darse por vencido a la primera y limitarse, por ejemplo, a decir: el universo es como es porque nosotros estamos aquí. Hay que llevar más lejos las fronteras, aunque sea con especulaciones.

Küng: En la teología nos hemos vuelto muy precavidos con el concepto de especulación, sobre todo porque ha acabado desacreditado. Hoy apenas suele designar algo más que construcciones totalmente arbitrarias; con Hegel era distinto. Prefiero hablar de reflexión, ya que, al fin y al cabo, queremos dar una justificación racional de nuestra fe.

Spektrum: ¿Hay, pues, una teología racional?

Küng: Si se entiende racional no como racionalista, sino como razonable, entonces sí. La razón no se deja sólo para los científicos; también los teólogos deberían poder justificar cada uno de sus pasos.

Spektrum: Pero este acercamiento entre ciencia y religión, ¿es sólo una fachada retórica o hay algo más profundo?

Börner: Para mí, se da una tensión enorme entre las reflexiones religiosas y nuestra descripción científica. Si me miro a mí mismo, soy un sistema de átomos y electrones, en el que cada estado determina al que le sigue, bien con estricta causalidad, bien según las leyes de la probabilidad. Funciona como una máquina biológica. Pero en lo profundo de mi ser estoy convencido de que esto no es todo.

Spektrum: ¿Qué más ha de haber?

Börner: Queda un resto, que mal puedo describir. Tengo la sensación de que subsiste esa tensión entre la descripción física del mundo y la teología. Puedo admitir que el yo, ese yo que me represento, sea una ilusión, pero no tiene por qué ser así. Se deberían mantener estas tensiones y no darse por satisfecho precipitadamente con una conciliación cualquiera. Lo cierto es que la imagen científica del mundo tiene la carencia de que el sujeto pensante, la mente, no aparece en ella. Sin embargo, yo no puedo admitir ningún influjo que no esté condicionado por las leyes naturales. Aquí sitúo yo la gran insuficiencia.



Conocemos nuestros límites. Sabemos que no lo sabemos todo, ni unos ni otros

Küng: Para mí, se trata de una convergencia muy real, precisamente porque sé que ambas esferas son muy diferentes. No estoy dispuesto a refrescar viejas confrontaciones, pero tampoco a que tan sólo haya una mera armonización. Vale para ambas partes, tanto para ciertos teólogos, cuando intentan sacar elementos de las ciencias de la naturaleza a favor, por ejemplo, de un "diseño inteligente", como para los científicos, que aprovechan arbitrariamente elementos de la religión. Sin exigirnos unos a otros algo falso, podemos sin embargo entendernos, ya que todos reconocemos los propios límites y sabemos que no lo sabemos todo, ni unos ni otros. La ciencia me proporciona muchas respuestas a problemas importantes. A la vez me alegra recibir mensajes de la religión sobre las grandes preguntas de la vida.

Spektrum: ¿Cuáles son?

Küng: ¿De dónde vengo? ¿Adónde voy?: ¿a la nada o a una realidad última? ¿Por qué existen el bien y el mal? ¿Por qué es mejor amar que odiar? Afectan también al científico, cuando, por la tarde, sale del laboratorio camino de casa. ¿Cómo no invitar a que se abran las puertas a una confianza en que no todo acaba con la muerte? De esto no hay ninguna prueba racional, pero sí fundamentos para una confianza racional, por los cuales yo soy de esta opinión. Lo que se cuenta acerca de las vivencias en la cercanía de la muerte me proporciona tan sólo una parte de la información. Me gustaría saber qué hay detrás de la puerta. Ahí, la religión ofrece un consuelo que excede toda razón. Y, por tanto, sé que el todo tiene un sentido para mí, por más que en la vida he experimentado también el sinsentido.

Börner: Lo que usted dice deja clara la diferencia. El conocimiento que alcanzan los científicos es insobornable. No depende de que yo prefiera que algo concreto fuera diferente; no hay nada que elegir. Yo no he de confiar en las leyes físicas; sencillamente, están ahí. Tienen validez tanto si quiero como si no. En la religión es totalmente distinto. Sería un error traducir los conceptos religiosos en términos físicos para elaborar una especie de religión fisicalista. No funcionaría.

Küng: Con todo, es maravillosa la libertad que ahí transpira. En la religión a nadie se le obliga a nada. Cierto que puedo decir que la evolución tiene un sentido. Pero no lo puedo derivar sólo de la teoría de la evolución. Aquí cada uno es libre. Si alguien dice que no sabe de qué le sirve Dios, para mí está al mismo nivel que quien dice: no sé de qué me sirve Mozart. Se requiere un poco de esfuerzo, tanto si se trata de Mozart, como de la ciencia o de Dios. La solución no es una teología de sobremesa.

Spektrum: Doctor Küng, doctor Börner, muchísimas gracias por la conversación.

MANFRED GROHE/*Spektrum der Wissenschaft*



TRENZANDO LAS LINEAS DEL MUNDO (trayectorias espaciotemporales) de ciertas partículas especiales sería posible efectuar cómputos cuánticos que ningún ordenador normal (clásico) podría realizar. Tales partículas moran en un fluido denominado "gas electrónico bidimensional".

Computación con nudos cuánticos

Una máquina basada en los "alones", un cierto tipo muy peculiar de partícula, que representa cálculos mediante conjuntos de trenzas en el espaciotiempo, podría acercarnos a un método práctico de computación cuántica

Graham P. Collins

Las computadoras cuánticas prometen ser capaces de cómputos tenidos por imposibles con los ordenadores "normales". Algunos de esos cálculos revisten gran importancia en el mundo real. Por ejemplo, ciertos métodos de encriptación muy utilizados podrían descerrajarse mediante una computadora que efectuase la descomposición factorial de números grandes en tiempos razonables. Apenas hay método de encriptación utilizado hoy para la salvaguarda de datos muy importantes que no pudiera ser vulnerado por algún tipo de algoritmo cuántico.

La potencia excepcional de una computadora cuántica se debe a que opera sobre información representada mediante *qubits* —bits cuánticos— en lugar de hacerlo sobre meros bits. Un bit ordinario, clásico, solamente puede tomar los valores 0 y 1, y las arquitecturas típicas de los microcircuitos están concebidas para imponer esa dicotomía con todo rigor. Un qubit, en cambio, puede hallarse en un "estado de superposición", estado que supone la coexistencia simultánea de ciertas proporciones de 0 y de 1. Los estados de los qubits pueden equipararse a puntos sobre una esfera. El polo norte sería el 1 clásico, el polo sur, el 0, y los puntos intermedios corresponderían a todas las posibles superposiciones de 0 y 1 [*véase* "Reglas para un mundo cuántico complejo", por Michael A. Nielsen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2003]. La libertad de los qubits para vagabundear por la superficie de la esfera confiere a las computadoras cuánticas sus excepcionales cualidades.

Desdichadamente, la construcción de computadoras cuánticas parece sumamente difícil. Los qubits suelen plasmarse en las propiedades cuánticas de partículas atrapadas (iones atómicos individuales o electrones aislados). Pero los estados de superposición son de una fragilidad superlativa, y pueden quedar destruidos por las más diminutas interacciones accidentales con el medio circundante, en el que se ha de contar todo el material que compone la computadora propiamente dicha. Si los qubits no están muy bien aislados de sus inmediaciones, dichas perturbaciones introducirán errores en el cómputo.

En consecuencia, casi todos los proyectos de computadoras cuánticas se centran en hallar formas de minimizar las interacciones de los qubits con su entorno. Se sabe que si la tasa de errores pudiera reducirse hasta un error en cada 10.000 pasos, cabría implantar métodos de corrección de errores que compensasen la degradación de los qubits individuales. La construcción de una máquina capaz de albergar un gran número de qubits con aislamiento suficiente para lograr una tasa de errores tan reducida es empresa de una dificultad abrumadora, que los físicos están lejos de poder lograr.

Unos pocos investigadores han tomado una vía muy distinta para construir una computadora cuántica. En su metodología, los delicados estados cuánticos dependen de las propiedades topológicas de un sistema físico. La topología se propone el estudio matemático de aquellas propiedades que se conservan cuando un objeto es deformado mediante estiramientos, aplastamientos o torsiones, pero sin efectuar cortes ni adherir piezas. Una de sus disciplinas es la teoría de nudos. Las perturbaciones pequeñas no alteran las propiedades topológicas. Por ejemplo, un lazo que contenga un nudo es topológicamente distinto de un aro de cordel sin nudos (*véase el recuadro* "Topología y nudos"). La única forma de transformar un aro liso en un aro que contenga un nudo es cortarlo, hacer el nudo y volver a unir inseparablemente los extremos. De forma análoga, para modificar un qubit topológico y llevarlo a un estado cuántico diferente hay que violentarlo de forma similar. Pequeños tirones o sacudidas del ambiente no lo lograrían.

A primera vista, una computadora cuántica topológica apenas si se parece a una computadora. Efectúa sus cálculos sobre cuerdas trenzadas; cuerdas, por otra parte, que no son cuerdas materiales en el sentido habitual. Consisten, más bien, en "líneas del mundo", representaciones de partículas en su desplazamiento por el tiempo y el espacio. (Conviene imaginar que la longitud de una de estas cuerdas representa el movimiento de la partícula y, el grosor, sus dimensiones físicas.) Además, ni siquiera las partículas en que se basan se parecen a electrones o protones, como se podría esperar. Consisten en cambio en cuasipartículas: excitaciones en un sistema electrónico bidimensional, que se comportan en buena medida como las partículas y las antipartículas de la física de grandes energías. Y para mayor complicación, las cuasipartículas —que han sido llamadas "alones"— han de ser de un tipo especial que posea las propiedades matemáticas necesarias.

He aquí el aspecto que podría ofrecer un cómputo: en primer lugar, se crean pares de alones y se los sitúa a largo de una recta (*véase el recuadro* "Así opera la computación cuántica topológica"). Cada par de alones viene a ser como una partícula y su correspondiente antipartícula, creadas con pura energía.

GEORGE RETSECK

A continuación, muévanse los pares de alones adyacentes uno alrededor del otro, obedeciendo a una secuencia precisa. La línea del mundo de cada alón constituye una hebra de una trenza, y los movimientos de los alones, al ser permutados de diversas formas, producen un trenzado de todas las hebras. La computación cuántica queda plasmada en la trenza concreta así formada. Los estados finales de los alones, que constituyen el resultado del cómputo, están determinados por la trenza y no por cualesquiera interacciones parasitarias eléctricas o magnéticas. Y dado que la trenza es topológica —al deformar las hebras un poquito en un sentido u otro, la trenza no cambia—, queda, por su propia naturaleza, a salvo de perturbaciones externas. La idea de utilizar alones para efectuar cómputos por este procedimiento fue propuesta en 1997 por Alexei Y. Kitaev, que en la actualidad trabaja en Microsoft.

Michael H. Freedman, hoy también en Microsoft, había expuesto ya en el otoño de 1988, en unas lecciones impartidas en la Universidad de Harvard, la posibilidad de utilizar topología cuántica en la computación. Estas ideas, publicadas en un artículo de investigación en 1998, se basaban en el descubrimiento de que ciertas magnitudes matemáticas, los "invariantes nodales", estaban asociadas a las propiedades cuánticas de una superficie bidimensional que evoluciona en el tiempo. Si resultase posible crear un modelo material del sistema físico y realizar las medidas adecuadas, el invariante del nudo quedaría automáticamente computado de forma aproximada, en lugar de tener que ser calculado mediante un proceso de larguísima duración en un ordenador común. Y se dispondría de atajos parecidos para problemas igualmente difíciles, pero más vinculados con el mundo real.

Aunque todo esto pueda parecer una fantasiosa teorización, muy alejada de la realidad, experimentos recientes sobre un fenómeno físico ya conocido, el efecto Hall cuántico fraccionario, han asentado el cálculo con alones sobre cimientos más firmes. Se han propuesto experimentos adicionales que podrían considerarse rudimentos de una computación cuántica topológica.

Alones

Como ya se ha mencionado, una computadora topológica cuántica va trenzando líneas de mundo por intercambio de las posiciones de partículas. Una de las muchas formas en que la física cuántica se diferencia de manera fundamental de la física clásica es en el comportamiento de las partículas cuando se las permuta. Según la física clásica, si dos electrones están situados en los puntos A y B, y se intercambian sus posiciones, el estado final es idéntico al inicial: como los electrones son indistinguibles, también los estados inicial y final. En la mecánica cuántica, las cosas no son tan sencillas.

La diferencia se debe a que la mecánica cuántica describe el estado de las partículas mediante una "función de onda", una onda en el espacio que contiene la probabilidad de encontrarlas en uno u otro punto, o la probabilidad de que las mediciones de su velocidad caigan en tal o cual intervalo, etc. En particular, hay mayor probabilidad de hallar una partícula en una determinada región o en un determinado intervalo de velocidad allí donde su función de onda alcance una gran amplitud.

Un par de electrones es descrito por una función de onda conjunta, y al intercambiar sus posiciones, la nueva función de onda conjunta es de signo opuesto al de la primera. Tal cambio torna en senos lo que antes eran crestas de la onda, y viceversa, pero no repercute en la amplitud de las oscilaciones. De hecho, no modifica ninguna magnitud medible asociada a los electrones cuando éstos son considerados aisladamente.

Lo que sí cambia es la forma en que estos electrones podrían interferir con otros. La interferencia es resultado de la suma o composición de dos ondas. Cuando dos ondas se interfieren, en los puntos donde las crestas de ambas estén alineadas, o "en fase", la suma tiene una amplitud grande ("interferencia constructiva"), pero donde se encuentren en antifase, es decir, donde se sumen una cresta y un seno ("interferencia destructiva"), la amplitud resultante será pequeña. Al multiplicar una de las ondas por el coeficiente (–1), se intercambian crestas y senos, y las interferencias constructivas, puntos brillantes, se truecan en interferencias destructivas, puntos oscuros.

Pero no son únicamente los electrones las partículas afectadas por el cambio de signo explicado: lo mismo les ocurre a los protones, los neutrones y, en general, a cualesquiera de las partículas llamadas fermiones. La otra gran clase de partículas, los bosones, se caracterizan porque sus funciones de onda no varían cuando dos partículas son permutadas de lugar. Se podría decir que sus funciones de ondas son multiplicadas por un coeficiente +1.

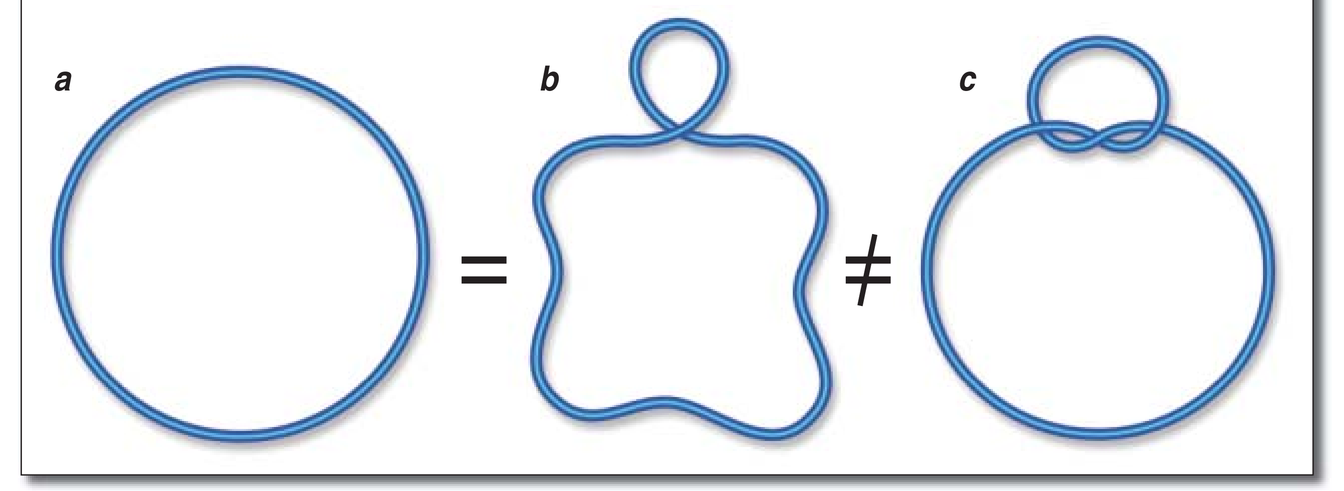
Profundas razones matemáticas exigen que las partículas cuánticas en tres dimensiones hayan de ser, o bien fermiones, o bien bosones. Pero en dos dimensiones cabe otra posibilidad: el coeficiente podría ser un "fasor", o sea, un número comple-

Resumen/Trenzas cuánticas

- La computación cuántica promete superar con mucho las capacidades de los ordenadores clásicos. Mas para funcionar, las tasas de error habrán de ser muy pequeñas. Las tasas de error requeridas trascienden lo factible con los recursos técnicos disponibles y los diseños ordinarios.
- La computación cuántica topológica ofrece una concepción diferente: se valdría de un sistema físico radicalmente distinto para llevar a la práctica la computación cuántica. Las perturbaciones pequeñas no modifican las propiedades topológicas; ello les confiere una resistencia intrínseca a los errores provocados por las interacciones espurias con el medio circundante.
- La computación cuántica topológica se valdría de unas excitaciones predichas por razones teóricas, llamadas alones, unas estructuras similares a las partículas, posibles sólo en un mundo bidimensional. Ciertos experimentos recientes han indicado la existencia de alones en estructuras planares de un material semiconductor enfriadas hasta las cercanías del cero absoluto e inmersas en campos magnéticos intensos.

TOPOLOGIA Y NUDOS

La topología de un aro (*a*) no sufre alteración si la cuerda sólo se dobla y deforma (*b*), pero es distinta de la correspondiente a un lazo (*c*). Es imposible crear el nudo deformando el aro de cuerda: hay que cortarlo, anudarlo y volver a unir sus extremos. Por consiguiente, la topología del nudo es insensible a perturbaciones exteriores que se limiten a deformar la cuerda.



GEORGE RETSECK

jo de módulo 1. Conviene concebir al fasor como un giro. El giro de cero grados corresponde al número +1; un giro de 180 grados es (–1). Los ángulos intermedios son números complejos unitarios. Por ejemplo, el giro de 90 grados equivale al número complejo *i*: su cuadrado (dos giros consecutivos de 90 grados) es (–1). El producto de una función de ondas por un fasor no tiene efecto alguno sobre las propiedades medibles de la partícula aislada, como ocurría cuando el coeficiente era (–1), porque lo único que importa para tales propiedades son las amplitudes de las oscilaciones de la onda. La fase, en cambio, sí puede alterar la forma en que se interfieren dos ondas complejas.

Las partículas que al ser intercambiadas de lugar adquieren fase se llaman *alones*, porque podría aparecer un fasor cualquiera (*any* en inglés, de ahí su denominación en ese idioma de *anyons*), y no sólo un +1 o de –1 (la raíz griega de alones alude a esa diversidad de posibilidades) [*véase* “Alones”, de Frank Wilczek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1991]. No obstante, las partículas de una especie dada siempre adquieren la misma fase.

Electrones en Planilandia

Los alones existen solamente en un mundo bidimensional. ¿Cómo podremos producir pares de ellos, destinados a la computación topológica, si nosotros vivimos en tres dimensiones? La respuesta se encuentra en el reino planilandés de las cuasipartículas. Es posible preparar cuidadosamente dos laminillas de arseniuro de galio (un compuesto semiconductor) de modo que den acomodo en su interfaz a un “gas” de electrones. Los electrones se mueven libremente en las dos dimensiones de la interfaz, pero no pueden hacerlo en la tercera dimensión, que les separaría de ella. Tales sistemas de electrones, llamados gases electrónicos bidimensionales, han sido muy estudiados, sobre todo, cuando dichos sistemas se hallan en el seno de campos magnéticos transversales muy intensos y a temperaturas sumamente bajas, pues en tales condiciones manifiestan propiedades cuánticas inusitadas.

Por ejemplo, en el efecto Hall cuántico fraccionario, ciertas excitaciones en el gas electrónico se comportan como partículas dotadas de una fracción de la carga de un electrón. Otras excitaciones llevan a su alrededor unidades del flujo magnético, como si el flujo fuese parte constituyente de la partícula. En 2005, Vladimir J. Goldman, Fernando E. Camino y Wei Zhou, todos de la Universidad Stony Brook, afirmaron tener confirmación experimental directa de que las cuasipartículas que intervienen en el efecto Hall fraccionario son alones, un primer paso crucial para la metodología topológica de computación cuántica. No obstante, algunos investigadores siguen buscando pruebas de diversa índole que demuestren la naturaleza alónica de las cuasipartículas, porque es concebible que determinados efectos no cuánticos pudieran producir los resultados observados por Goldman y sus compañeros.

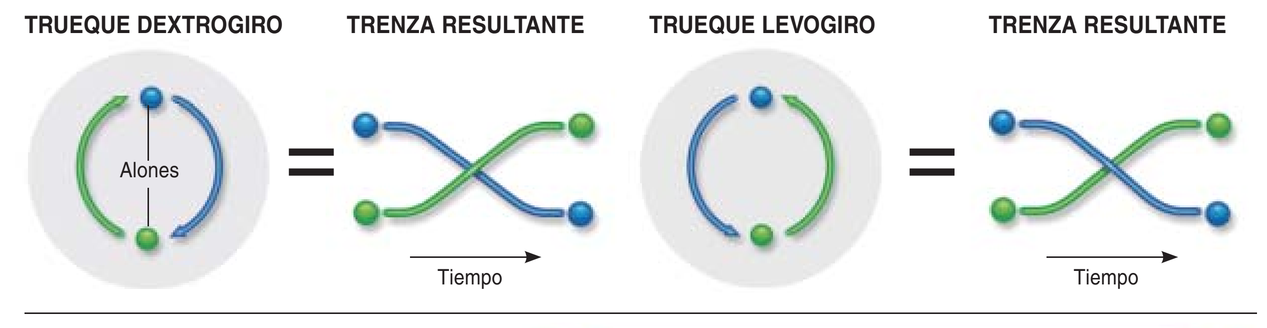
El intercambio de posición de dos partículas suscita, en dos dimensiones, un nuevo aspecto importante: al trocar sus posiciones, ¿siguen las partículas caminos que giran en sentido horario, o dextrógiro, o en sentido antihorario, o levógiro? La fase que adquiera la función de onda depende de esa propiedad. Las dos rutas posibles son topológicamente distintas, pues el experimentador no puede deformar de manera continua los caminos que giran en sentido horario hasta hacer que vayan en sentido levógiro sin que los caminos se crucen y las partículas choquen en algún punto intermedio.

La construcción de una computadora topológica cuántica entraña una complicación adicional: los alones tienen que ser “no abelianos”. Ello significa que no es indiferente el orden en el que sean permutadas las partículas. Supongamos que se tengan tres alones idénticos en línea, en las posiciones A, B y C. Permutemos primero entre sí los alones de las posiciones A y B. Seguidamente, intercambiemos los ahora ubicados en B y C. El resultado será la fun-

ASI OPERA LA COMPUTACION CUANTICA TOPOLOGICA

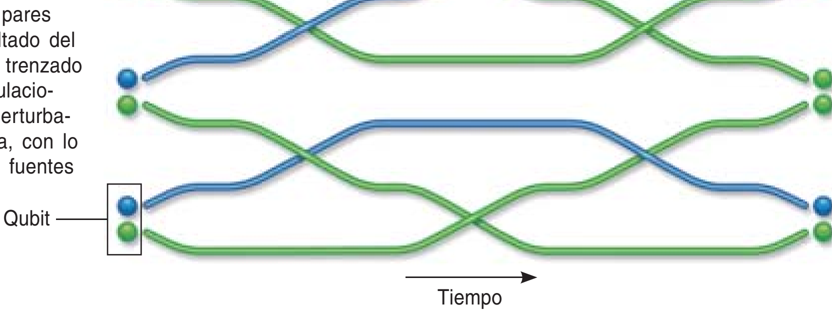
TRENZADO

Bastan dos movimientos elementales en el plano —los trueques en sentido dextrógiro o en sentido levógiro— para generar todos los trenzados posibles de las líneas de mundo de un conjunto de alones.

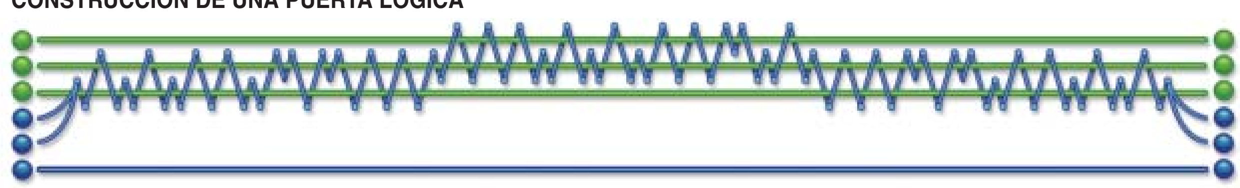


COMPUTACION

En primer lugar, se crean y ponen en fila pares de alones, que representarán los bits cuánticos, o qubits, del cómputo que se ha de efectuar. Los alones se llevan de un lugar a otro por trueque de las posiciones de alones adyacentes en una secuencia determinada. Estos movimientos corresponden a operaciones efectuadas con los qubits. Finalmente, se reúnen y miden los pares de qubits adyacentes para obtener el resultado del cómputo, que depende de la topología del trenzado particular producido mediante estas manipulaciones. Aunque los alones sufran pequeñas perturbaciones, la topología de la trenza no cambia, con lo que el cómputo no queda afectado por las fuentes normales de error.



CONSTRUCCION DE UNA PUERTA LOGICA



Esta compleja trenza de seis alones produce una puerta lógica NOC. La puerta NOC toma dos qubits de entrada y produce dos qubits de salida. Estos qubits están representados mediante ternas de los llamados alones de Fibonacci (*en verde y en azul*). El método concreto de trenzado, que consiste en dejar una terna en su lugar y mover dos alones de la otra terna en torno a los alones de la primera, permitió simplificar los cálculos necesarios en el diseño de la puerta. El anterior procedimiento de trenzado produce una puerta NOC cuya precisión es de aproximadamente 10^{-3}.

GEORGE RETSECK

ción de onda original multiplicada por un cierto coeficiente. Supongamos, en cambio, que primero sean intercambiados B y C, y que a continuación lo sean los situados en A y B. Si el resultado es la función de ondas multiplicada por el mismo coeficiente que antes, se dice que los alones conmutan, o que son "abelianos". En cambio, si los coeficientes son distintos según el orden de las permutas, se habla de alones no abelianos. (La no-abelianidad se debe a que para estos alones, el coeficiente que multiplica a la función de ondas es una matriz numérica, y el resultado de multiplicar dos matrices depende del orden en que se efectúe su producto.)

El experimento realizado por el equipo de Goldman hacía uso de alones abelianos. No obstante, los teóricos tienen poderosas razones para creer que ciertas cuasipartículas de efecto Hall fraccionario son realmente no-abelianas. Se han propuesto experimentos para zanjar la cuestión. Uno ha sido sugerido por Freedman, juntamente con Sankar Das Sarma, de la Universidad de Maryland, y Chetan Nayak, de Microsoft Research, con refinamientos propuestos por Ady Stern, del Instituto Weizmann de Israel, y Bertrand Halperin, de la Universidad de Harvard; el segundo fue presentado por Kitaev, Parsa Bonderson, del Instituto de Tecnología de California, y por Kiril Shtengel, que ahora se encuen-

tra en la Universidad de California en Riverside.

Trenzas y puertas

En cuanto se tengan alones no abelianos, se podrá generar una representación física del "grupo de trenzado". Esta estructura matemática describe la totalidad de las formas en que una determinada serie de hebras puede trenzarse. Toda trenza puede formarse mediante una secuencia de operaciones elementales en las que se intercambian entre sí dos hebras adyacentes mediante un trueque de sentido, sea dextrógiro, sea levógiro. Cada posible secuencia de manipulaciones de alones se corresponde con una trenza, y recíprocamente. A cada trenza le corresponde también una matriz muy complicada, que es el resultado de combinar todas las matrices individuales de cada uno de los intercambios alónicos.

Disponemos ahora de todos los elementos necesarios para ver cómo estas trenzas corresponden a una computación cuántica. En un ordenador común, el estado del ordenador está representado por el estado colectivo de todos sus bits: por la secuencia concreta de ceros y unos que hay en su registro. De forma similar, una computadora cuántica está representada por el estado combinado de todos sus qubits. En una computadora cuántica topológica, los qubits pueden ser representados por grupos de alones.

En una computadora cuántica, el proceso que lleva desde el estado inicial de todos los qubits a su estado final está descrito por una matriz que multiplica la función de onda conjunta de los qubits. La semejanza con lo que ocurre en una computadora cuántica topológica es obvia: en tal caso, la matriz es la asociada con la trenza particular que corresponde a la secuencia de manipulaciones de alones. Hemos verificado, pues, que las operaciones efectuadas sobre los alones dan por resultado una computación cuántica.

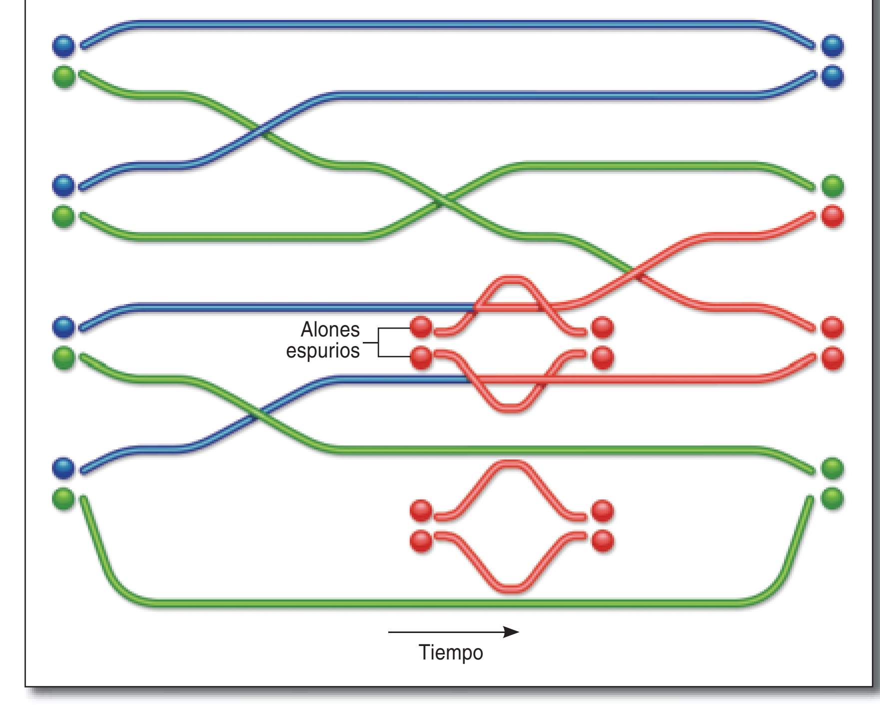
Es necesario confirmar otra importante propiedad: ¿podrá nuestra computadora cuántica efectuar *cualquier* cómputo que pueda realizar un ordenador al uso? Freedman, con Michael Larsen, de la Universidad de Indiana, y con Zhenghan Wang, actualmente en Microsoft, demostró en 2002 que una computadora cuántica topológica simularía, en efecto, cualquier cómputo que realizase una computadora cuántica ordinaria, aunque con una reserva: la simulación sería sólo aproximada. En cualquier caso, dada una precisión deseada cualquiera, como puede ser una parte en 10^4, es posible hallar una trenza que simule el cómputo deseado con esa precisión. Cuanto más fina sea la precisión exigida, tanto mayor habrá de ser el número de cruzamientos de la trenza. Felizmente, el número de cruces necesario aumenta muy lentamente, por lo que no es difícil lograr una precisión muy grande. Lo malo es que la demostración no indica *cómo* determinar la trenza concreta que corresponde al cómputo, ni, en particular, la especie de alones que se ha de utilizar, ni su relación con qubits elementales.

El problema de hallar trenzas para efectuar cómputos concretos fue abordado en 2005 por Nicholas E. Bonesteel, de la Universidad del Estados de Florida, junto con sus colaboradores en esa institución y los Laboratorios Bell de Lucent Technologies. Este equipo mostró explícitamente cómo se podría construir una puerta inversora controlada (una puerta NOC) con una precisión de 2 partes en 10^3 mediante un trenzado de seis alones. Una puerta NOC cuenta con dos entradas: un bit de control y un bit diana. Si el bit de control es 1, la puerta cambia el bit diana de 0 en 1, o viceversa; de no ser así, los bits no se modifican. Actuando sobre qubits, resulta posible construir cualquier cómputo a partir de una red de puertas NOC y de otra operación más: la multiplicación de qubits individuales por un fasor complejo. Este resultado constituye otra confirmación de que las computadoras cuánticas topológicas pueden realizar cualquier cómputo cuántico.

Las computadoras cuánticas pueden realizar proezas tenidas por imposibles para los ordenadores clásicos. ¿Es posible que una computadora topológica sea más potente que una computadora cuántica ordi-

EVITACION DE ERRORES ALEATORIOS

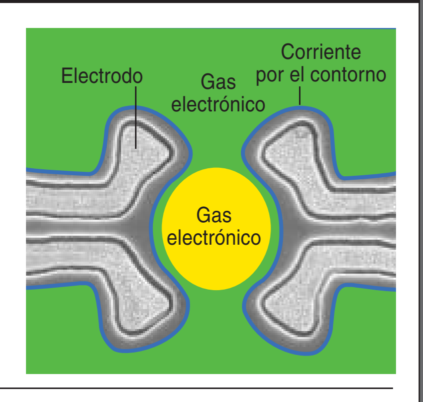
En una computación topológica se producen errores si las fluctuaciones térmicas generan pares espurios de alones que se entretejan con la trenza del cómputo antes de aniquilarse entre sí. Esos elementos espurios corrompen el cómputo (*líneas rojas*). Sin embargo, la probabilidad de esta interferencia decae exponencialmente con la distancia que recorren los alones. Se puede minimizar la tasa de errores manteniendo a suficiente distancia los alones que participan en el cómputo (*par inferior*).



GEORGE RETSECK

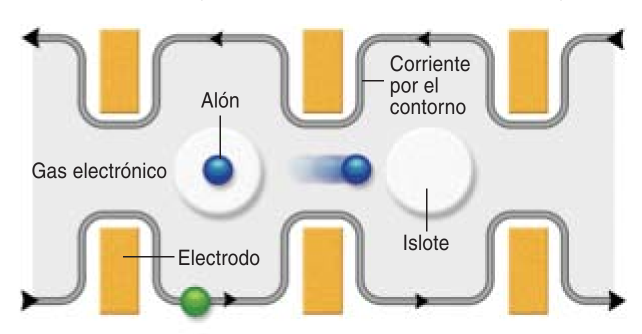
ERRORES TOPOLOGICOS

DETECTOR DE ALONES
Con el dispositivo de esta microfotografía coloreada, Vladimir J. Goldman y sus colaboradores demostraron que ciertas cuasipartículas (excitaciones en el estado Hall cuántico) se comportan como alones. Se introdujo el dispositivo, una vez enfriado hasta los 10 milikelvin, en un campo magnético intenso. Se formó en torno a los cuatro electrodos un gas electrónico bidimensional, con presencia de diferentes tipos de cuasipartículas en las regiones amarillas y verdes. Ciertas características de la corriente que fluía a lo largo del contorno permitió confirmar que las cuasipartículas del islote amarillo eran alónicas.

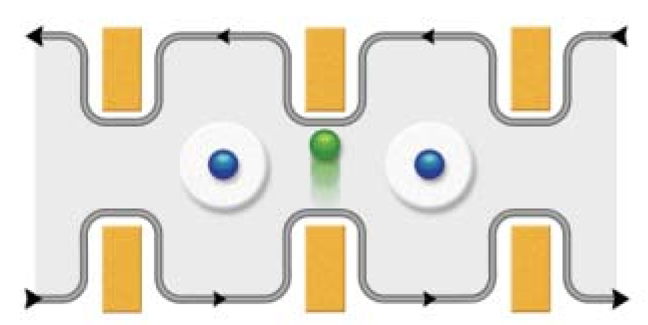


PUERTA NO
Esta propuesta de puerta lógica se funda en un estado Hall cuántico fraccionario con alones dotados de la cuarta parte de la carga de un electrón. Los electrodos inducen dos islotes donde pueden atraparse alones. La corriente fluye a lo largo del contorno, pero en condiciones adecuadas puede también atravesar los estrechos istmos por efecto túnel.

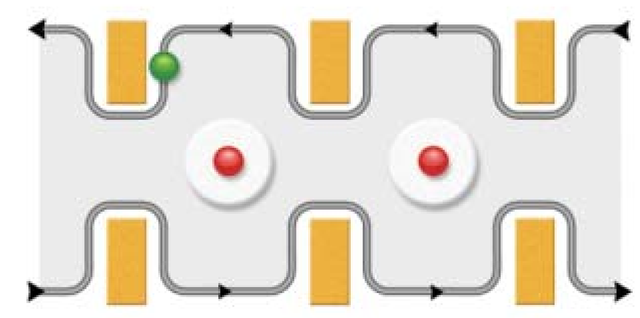
1 La puerta se inicializa situando dos alones (*en azul*) en un islote y aplicando seguidamente voltajes para transferir uno de ellos al otro islote. Este par de alones representa al qubit en su estado inicial, que puede averiguarse midiendo el flujo de corriente a lo largo del contorno vecino.



2 Para invertir el estado del qubit (operación NO) se aplican voltajes que inducen a un qubit (*en verde*) de la frontera a atravesar el dispositivo por efecto túnel.



3 El paso de este alón cambia la relación de fases de los dos alones, con lo que el estado del qubit se trueca en el estado opuesto (*en rojo*).



naria? Otro teorema, de Freedman, Kitaev y Wang, lo niega. Demostraron que el funcionamiento de una computadora cuántica topológica puede simularse eficientemente, con la precisión que se quiera, en una computadora cuántica ordinaria: cuanto la máquina topológica pueda computar, podrá hacerlo la máquina cuántica convencional. Este resultado sugiere un teorema más general: cualquier sistema de computación suficientemente avanzado que utilice recursos cuánticos tiene exactamente las mismas capacidades computacionales. (Una tesis análoga para la computación clásica fue propuesta por Alonzo Church y Alan Turing en los años treinta.)

Entran partículas, salen resultados

Hemos pasado por alto dos procesos cruciales para la construcción de una computadora cuántica topológica realizable: la inicialización de los qubits previa al comienzo del cómputo y la lectura de los resultados al terminarlo.

El paso de inicialización entraña la generación de pares de cuasipartículas, y el problema estriba en saber qué especie de cuasipartícula se ha creado. El procedimiento básico consiste en hacer pasar alones de prueba en torno a los pares generados y medir después cómo se han modificado esos alones de prueba en dicho proceso, cosa que depende de la especie de alones por los que hayan pasado. (Si un alón de prueba ha sufrido modificación, ya no será limpiamente aniquilado con su compañero.) Los pares de alones que no sean del tipo requerido serían desechados.

La fase de lectura entraña asimismo la medición de estados alónicos. Mientras los alones estén ampliamente separados, tal medición es imposible: para poder medirlos hay que reunirlos por pares. Hablando sin precisión, viene a ser como una comprobación de que los pares se aniquilan limpiamente, como auténticas antipartículas, o de que dejan residuos de carga y de flujo magnético, lo que revela que sus estados han sido alterados por el trenzado, apartándolos de la exacta relación de antipartículas que tuvieron en el comienzo de sus vidas.

GEORGE RETSECK (*ilustración*); DE F. E. CAMINO ET AL. EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 95; 2005 (*micrografía*)

Por otra parte, no es cierto que una computadora topológica sea totalmente inmune a los errores. La causa principal de los errores son las fluctuaciones térmicas en el material del sustrato, que pueden generar un par adicional de alones, que se entretejerán con la trenza correspondiente al cómputo, para finalmente aniquilarse entre sí (*véase el recuadro* "Evitación de errores aleatorios"). Por fortuna, el proceso de generación térmica queda suprimido a las bajísimas temperaturas a las que habría de operar una computadora topológica. Además, la probabilidad de que ocurra todo el proceso indeseado disminuye exponencialmente a medida que aumenta la distancia de viaje de los intrusos. Así pues, se puede alcanzar cualquier grado de precisión que se desee construyendo una computadora lo bastante grande y manteniendo a suficiente distancia los alones de trabajo mientras se los trenza.

La computación cuántica topológica sigue estando en pañales. Todavía no se ha demostrado la existencia de sus elementos básicos de funcionamiento —los alones no-abelianos— y aún están por construir las puertas lógicas más elementales. El experimento ya mencionado de Freedman, Das Sarma y Nayak podrían lograr ambos objetivos: si los alones implicados resultan efectivamente ser no-abelianos, el dispositivo efectuaría la operación lógica NOT —la inversión— sobre el estado del qubit. Este trío de investigadores ha estimado que la tasa de error correspondiente al proceso sería de 10^{-30} o menor. Tan diminuta tasa de error se debe a que la probabilidad de errores experimenta una reducción exponencial con la disminución de la temperatura y el aumento de las distancias. Dicho coeficiente exponencial constituye la aportación esencial de la topología, y carece de análogo en otras vías más tradicionales de abordar la computación cuántica.

Es la promesa de que las tasas de error serán extraordinariamente pequeñas —menores en muchos órdenes de magnitud a las conseguidas por cualquier otro sistema de computación cuántica— lo que confiere a la computación cuántica topológica tanto atractivo. Por otra parte, las técnicas necesarias para la construcción de dispositivos Hall cuánticos están maduras, pues son precisamente las utilizadas en la industria de microcircuitos; la única dificultad es que los dispositivos tienen que operar a temperaturas extremadamente bajas, del orden de milikelvin, para que las mágicas cuasipartículas sean estables.

Si los alones no-abelianos existen, las computadoras topológicas cuánticas podrían muy bien sobrepasar a los esquemas de computadora cuántica ordinarios en la carrera que ha de llevar desde los qubits individuales y las puertas lógicas hasta máquinas completas más dignas del título de "computadora". La realización de cálculos mediante nudos y trenzas cuánticas, que nació como una posibilidad esotérica, podría convertirse en la forma estándar de llevar a la práctica una computación cuántica factible y sin errores.

El autor

Graham P. Collins es redactor de *Scientific American* y doctor en físicas por la Universidad de Stony Brook. Agradece a Michael H. Freedman, director del Proyecto Q de Microsoft, su contribución a este artículo.

Bibliografía complementaria

TOPOLOGICALLY PROTECTED QUBITS FROM A POSSIBLE NON-ABELIAN FRACTIONAL QUANTUM HALL STATE. Sankar Das Sarma, Michael Freedman y Chetan Nayak en *Physical Review Letters*, vol. 94, págs. 166802-1—168802-4; 29 de abril, 2005.

DEVICES BASED ON THE FRACTIONAL QUANTUM HALL EFFECT MAY FULFILL THE PROMISE OF QUANTUM COMPUTING. Charles Day en *Physics Today*, vol. 58, págs. 21-24; octubre, 2005.

ANYON THERE? David Lindley en *Physical Review Focus*, vol. 16, artículo 14; 2 de noviembre, 2005.



1. UN NIÑO QUE SUFRE DIARREA GRAVE provocada por el rotavirus se salvará mediante una terapia de rehidratación. En los países pobres, sin embargo, donde el acceso a la asistencia sanitaria es limitado, hay muchísimos niños que no reciben tratamiento y mueren.

Vacunas contra los rotavirus

Tras 30 años de investigación, las vacunas contra la principal causa de diarrea infantil letal están listas para salir al mercado

Roger I. Glass

Cuando pensamos en un virus asesino, nos vienen a la mente imágenes de pacientes atacados por el virus Ebola en Africa, el virus del síndrome respiratorio agudo severo (SRAS) en Asia o el hantavirus en Estados Unidos. Sin embargo, esos verdugos se han cobrado muchas menos vidas que el rotavirus, cuyo nombre resulta desconocido para la mayoría.

El rotavirus infecta a prácticamente todos los niños en sus primeros años de vida. Provoca vómitos, seguidos de diarrea. A menudo, la diarrea es tan severa, que, si no se trata, causa un shock por deshidratación con resultado de muerte. Se estima que el rotavirus mata a 610.000 niños cada año en todo el mundo, lo que representa alrededor del 5 por ciento de las muertes de niños menores de 5 años. En los EE.UU. pocos niños perecen a causa del virus, pero cada año llegan hasta 70.000 los que deben ser hospitalizados y se cuentan por millones los que pasan episodios moderados en casa.

Pero nos hallamos a un paso de librarnos de ese flagelo. En enero del año en curso, tres decenios después de la identificación del patógeno, se anunció que dos vacunas contra los rotavirus habían superado con éxito ensayos clínicos a gran escala. El desarrollo de vacunas contra los rotavirus ha sido más difícil y complicado de lo imaginable. Un camino sembrado de fracasos y sorpresas.

Ahora, la Organización Mundial de la Salud y la Alianza Global para las Vacunas y la Inmunización han pasado a considerar de prioridad urgente la vacuna contra el rotavirus. La batalla final para conseguir la inmunización de la población infantil, tan apremiante, ha comenzado.

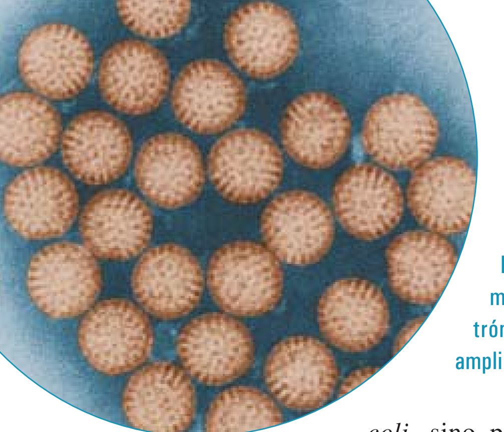
Identificación del factor contagioso

En 1973, Ruth Bishop, una joven microbióloga que trabajaba en enfermedades gastrointestinales en el Real Hospital Infantil de Melbourne, identificó al rotavirus como patógeno humano. En aquella época, los expertos se encontraban perplejos ante la diarrea infantil. Aunque se trataba de un trastorno común, grave en no pocos casos, no solían dar con la causa. Hasta que el grupo de Bishop observó al microscopio electrónico una biopsia de tejido extraído del duodeno, o intestino delgado, de niños gravemente enfermos. No acababan de creerse lo que veían: las células epiteliales que tapizan el intestino estaban infestadas de virus con forma de rueda.

Mi implicación personal en el campo de los rotavirus comenzó en 1979, cuando mi esposa y yo nos trasladamos a Bangladesh para trabajar en el Centro Internacional para la Investigación de Enfermedades Diarreicas. Nos motivaba la posibilidad de ayudar a los niños en un país donde la diarrea severa constituía una de las principales causas de mortalidad. Cada año, el hospital central de Dhaka admitía a tantos pacientes con gripe "intestinal" inespecífica, que algunos tenían que ser atendidos en pasillos o en tiendas de campaña plantadas en el exterior.

Convencidos de que la causa de la diarrea era bacteriana, nos extrañó que muchos pacientes no estuvieran infectados por cólera, salmonela, shigella o *Escherichia*

GEOFF WARD



2. LAS PARTICULAS DEL ROTAVIRUS presentan aspecto de rueda (de ahí su nombre *rota*, "rueda" en latín). La imagen, obtenida mediante microscopio electrónico, muestra las partículas ampliadas y coloreadas.

coli, sino por el rotavirus, del cual sabíamos muy poco. Mediante un test sencillo, comprobamos que el rotavirus era el responsable de entre un 25 y un 40 por ciento de los ingresos hospitalarios por diarrea de niños menores de cinco años.

Otros estudios realizados en diversos centros del mundo entero arrojaron resultados similares. Es más, pusieron de manifiesto que el rotavirus no sólo gozaba de una amplia difusión, sino que constituía además una de las causas principales de mortalidad en las regiones depauperadas. Ante tales datos, el Instituto de Medicina se vio obligado en 1985 a situar la infección por rotavirus en cabeza de una lista de enfermedades para las que se necesitaban con urgencia vacunas en los países en vías de desarrollo.

Al propio tiempo, sorprendía el desconocimiento que había sobre la incidencia y la distribución del rotavirus en los Estados Unidos. En 1986, cuando volví al Centro para el Control de Enfermedades (CDC) de Atlanta, el trastorno rara vez se diagnosticaba; de hecho, ni siquiera figuraba en la lista de la Clasificación Internacional de Enfermedades. Habiendo sido testigo del impacto de la enfermedad al otro lado del océano, mis colaboradores y yo nos empeñamos en determinar la incidencia de la misma en los Estados Unidos.

Pero, ¿cómo se evalúa la repercusión de una enfermedad que raramente se diagnostica, que nunca aparece entre las causas de hospitalización de los impresos de alta médica y que pasa inadvertida para la mayoría de los pediatras? Mei Shang Ho, de mi equipo, comenzó a estudiar los datos de hospitalizaciones infantiles estadounidenses. Descubrió que la diarrea era una causa frecuente de hospitalización: representaba el 12 por ciento de los ingresos de niños menores de cinco años; en la mayoría de los casos, se la suponía "de etiología desconocida".

Resumen/Vencer al rotavirus

- Con escasas excepciones, los niños contraen, al menos una vez, una infección por rotavirus; sin embargo, la enfermedad raramente se diagnostica como tal. Suele confundírsela con una gripe intestinal o estomacal.
- La enfermedad se cobra un tributo devastador entre la población infantil: decenas de miles de niños son hospitalizados cada año sólo en los EE.UU.; más de 600.000 mueren en los países más pobres.
- Desde que se descubrió el virus hace unos 30 años, hemos ahondado en su conocimiento. Sólo una vacuna es capaz de ponerle freno.
- Tras muchos ensayos fracasados contamos ya con varias vacunas contra el rotavirus que han demostrado seguridad y eficacia.

La investigación posterior puso de manifiesto que la mayoría de los casos no diagnosticados podía atribuirse al rotavirus. Se descubrieron tres factores más de interés en relación con el rotavirus. En primer lugar, la infección seguía un patrón estacional: alcanzaba un pico entre diciembre y marzo. En segundo lugar, la gran mayoría de los niños hospitalizados por ese motivo no habían cumplido cinco años; e independientemente de la estación, el rotavirus provocaba la mayoría de los casos de diarrea severa entre la población infantil.

Sabemos hoy que el rotavirus constituye la principal causa de diarrea infantil en todo el mundo. Infecta prácticamente a todos los niños de edad comprendida entre tres meses y cinco años. A diferencia de las bacterias, que se propagan a través de la comida y del agua contaminadas, con lo que afectan de forma mayoritaria a los habitantes de regiones pobres, el rotavirus supera las fronteras geográficas. De hecho, la propia ubicuidad del patógeno (los estadounidenses tienen el mismo riesgo de infección que los bangladesíes) apunta hacia su enorme potencial de contagio. Se propaga con la facilidad del virus del resfriado. E igual que ocurre con éste, ni la higiene ni la pureza del agua potable bloquean la transmisión.

Los estudios moleculares y clínicos dan fe de su virulencia. En un niño, bastan 10 partículas víricas para causar problemas; o sea, que una gotita cargada de virus vaya a parar a su pulgar o a uno de sus juguetes. Una vez en la boca, el virus sigue su curso hacia las células epiteliales que recubren el intestino delgado, donde se replica a una velocidad asombrosa: en 24 horas, 10 virus se convierten en millones, invadiendo y matando a las células con sus proteínas, toxinas y partículas de nueva creación. En poco tiempo, el epitelio del intestino se desprende y el cuerpo pierde una gran cantidad de fluidos y electrolitos en los ataques de diarrea. Sin una terapia de rehidratación, un niño pierde hasta un 10 por ciento de su peso corporal y entra en estado de shock en uno o dos días.

Afortunadamente, los niños que sobreviven a su primera infección no sufren secuelas a largo plazo. Muy pocos vuelven a sufrir otro brote de diarrea por rotavirus. Adquieren inmunidad natural, es decir, su sistema inmunitario se prepara para reconocer con prontitud al rotavirus y evitar su replicación la próxima vez que trate de invadirlo. Ahora bien, al ser tantos los niños que enferman gravemente durante la primera infección, estamos convencidos de que una vacuna capaz de mimetizar la inmunidad natural constituye la mejor esperanza para salvar vidas.

En busca de una vacuna

Las vacunas, uno de los medios de mayor eficacia en salud pública, se consideran armas poderosas dentro del arsenal que los humanos poseemos para luchar contra las enfermedades infecciosas. Fabricadas a partir de microorganismos (vivos o muertos) o a partir de sus proteínas básicas, las vacunas engañan al sistema inmunitario del receptor haciéndole creer que le están atacando. En respuesta, el sistema inmunitario produce anticuerpos contra la vacuna (que no supone ninguna amenaza biológica), de la misma forma que lo haría contra el propio virus. Igual que en la inmunidad na-

CHARLES D. HUMPHREY U.S. *Centro para el Control y Prevención de Enfermedades, EE.UU.*

tural, si el agente causante de la enfermedad invade al organismo, el sistema inmunitario se hallará totalmente preparado para producir grandes cantidades de anticuerpo y así combatirlo.

Hace veinte años, varias compañías farmacéuticas estudiaron la creación de una vacuna contra los rotavirus. Ante un mercado potencial imponente y de ámbito universal, los elevados costes del desarrollo de la vacuna parecían razonables. Además, la distribución resultaría sencilla, incluso en lugares remotos: la vacuna del rotavirus se incluiría en el Programa Universal para la Inmunización Infantil que, bajo los auspicios de la OMS y de UNICEF, ya distribuye las vacunas rutinarias entre el 80 por ciento de la población infantil mundial.

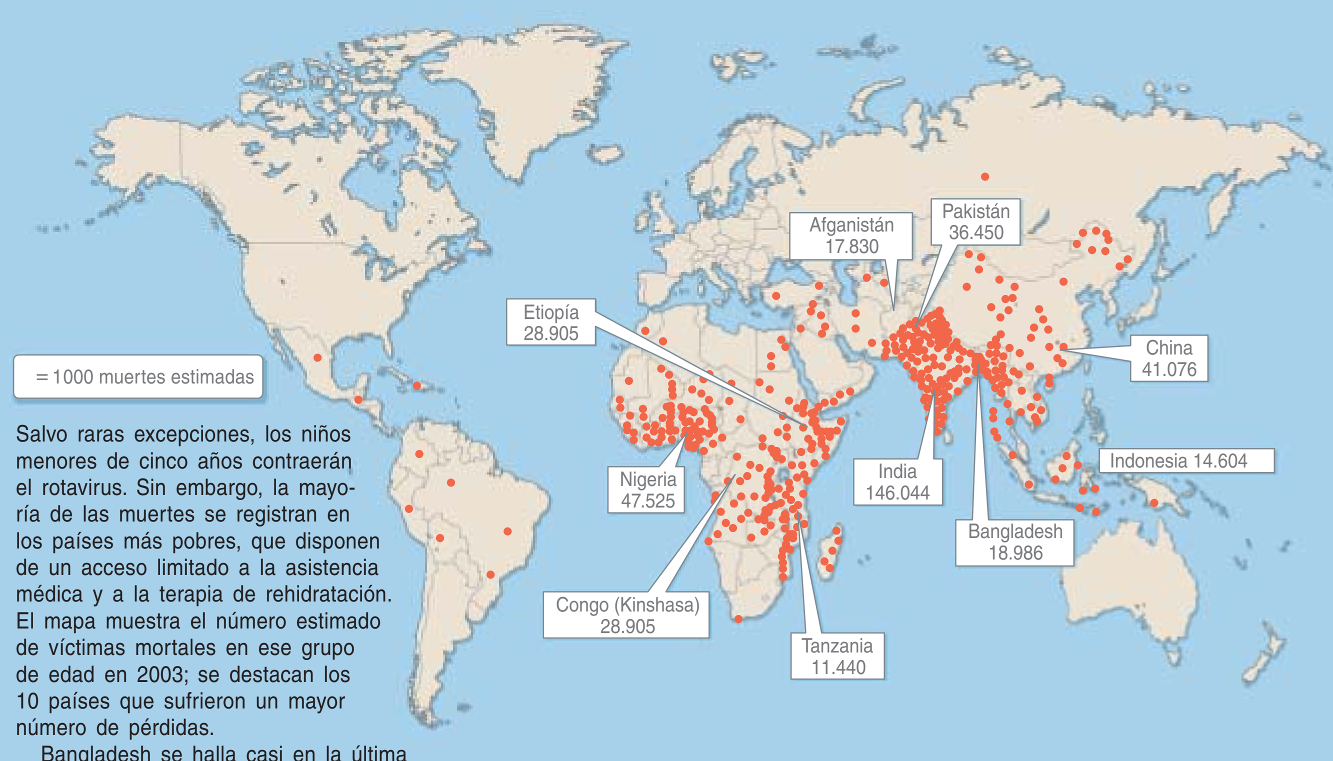
Aunque se ensayaron diversos enfoques (cepas humanas y cepas animales, virus vivos y virus muertos, virus completos o subunidades proteicas), los expertos en rotavirus siguieron la estela de Albert Sabin, el creador de la vacuna oral contra la poliomielitis. Sabin creía que las vacunas vivas, que si bien se replican en cierta medida, se muestran incapaces de desencadenar la enfermedad, remedaban la protección adquirida a través de la infección natural. Asimismo, en el caso del rotavirus, las vacunas orales instarían una respuesta inmunitaria allí donde importaba: en el tracto gastrointestinal. La atención de los investigadores se centró en cepas de rotavirus vivas, pero que estuviesen debilitadas o atenuadas y se pudiesen administrar por vía oral, sin inyección.

En 1983, la primera vacuna contra el rotavirus estaba lista para los ensayos clínicos. Francis Andre, de Smith Kline-RIT (ahora GlaxoSmithKline Biologicals) en Rixensart, y Timo Vesikari, de la Universidad de Tampere, prepararon y ensayaron una vacuna derivada de una cepa de rotavirus hallada en vacas. Escogieron un rotavirus bovino porque crecía bien en cultivo y porque se creía que en humanos se atenuaba de forma natural.

El primer ensayo, llevado a cabo en Finlandia, constituyó un hito: la vacuna redujo en un 88 por ciento la probabilidad de que un niño vacunado manifestase un cuadro grave de rotavirus. Se demostraba, pues, que una vacuna oral viva podía inducir la inmunidad. Además, la vacuna no acarreaba efectos secundarios preocupantes.

Espoleados por el éxito, los laboratorios Smith Kline-RIT pusieron en marcha ensayos clínicos en otros países.

Distribución de las muertes causadas por rotavirus



Salvo raras excepciones, los niños menores de cinco años contraerán el rotavirus. Sin embargo, la mayoría de las muertes se registran en los países más pobres, que disponen de un acceso limitado a la asistencia médica y a la terapia de rehidratación. El mapa muestra el número estimado de víctimas mortales en ese grupo de edad en 2003; se destacan los 10 países que sufrieron un mayor número de pérdidas.

Bangladesh se halla casi en la última posición de ese grupo, pero presenta la tasa de mortalidad *per cápita* a causa de la enfermedad más elevada. Con frecuencia, los habitantes de las zonas rurales deben desplazarse largas distancias con medios de transporte lentos (*izquierda*) para recibir ayuda. En Dhaka, los bebés con diarrea profusa que llegan al hospital se colocan en cunas que desaguan directamente sobre baldes cuya función es recoger los excrementos líquidos. En la fotografía (*derecha*), una madre, en el hospital, suministra a su hijo una disolución de rehidratación.





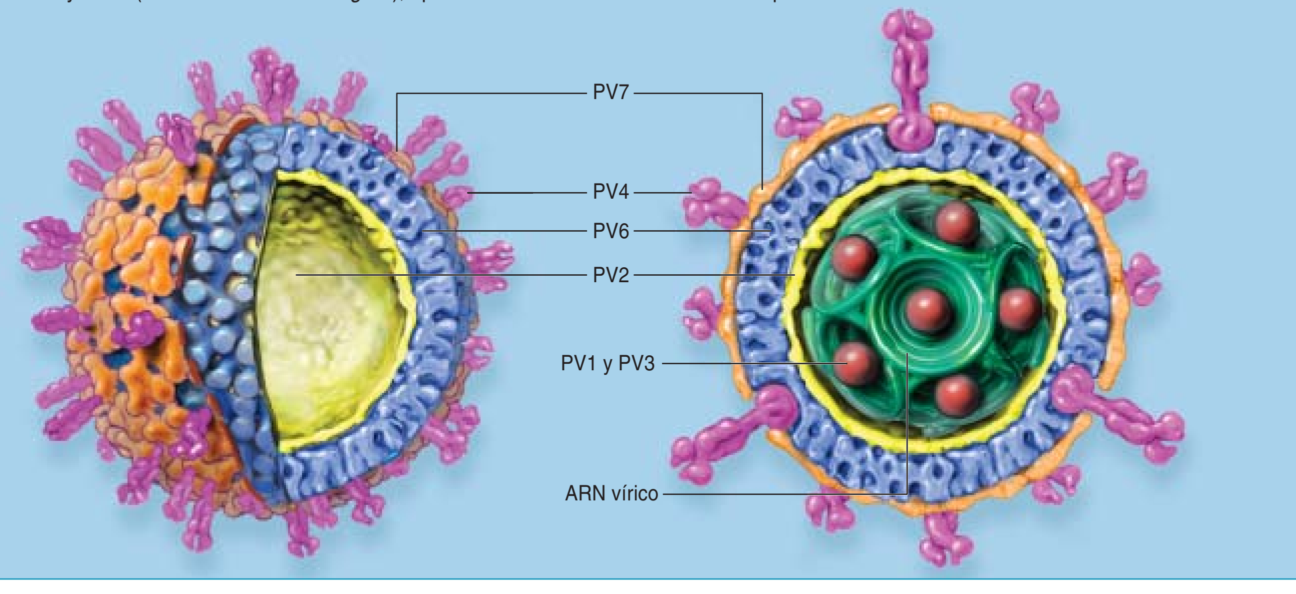
LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: UMESH D. PARASHAR *CDC (mapa)*; ASEM ANSARI *Centro Internacional para la Investigación de Enfermedades Diarreicas*, DHAKA, BANGLADESH *(fotografía izquierda)*; JEAN C. SACK *ICDDR (fotografía derecha)*

El rotavirus, de cerca

El rotavirus, representado en la ilustración mediante dos cortes transversales, consta de tres capas proteicas que rodean el genoma. Sus proteínas estructurales (las que están presentes en las partículas que se propagan de una persona a otra) se denominan PV y se numeran consecutivamente.

PV7 forma la capa más externa, tachonada de púas de PV4. Estas dos proteínas desencadenan en el huésped una respuesta inmunitaria para luchar contra la enfermedad; desempeñan, pues, un papel fundamental en las vacunas. PV4 facilita también la entrada del virus en las células, lo mismo que PV5 y PV8 (*no mostradas en la figura*), que son el resultado de la disgregación de PV4 en el interior del huésped. PV6 forma la capa intermedia; participa en la transcripción génica, proceso esencial para la síntesis de las proteínas víricas en las células infectadas. PV2 constituye la capa más interna. Las enzimas PV1 y PV3 intervienen en la copia de los genes víricos.

El genoma consta de 11 segmentos de ARN de doble hebra enrollados de forma compacta y empaquetados todos juntos. Codifican las PV y las proteínas no estructurales (PNE), entre las que se incluye la toxina PNE4, que se fabrica una vez el virus ha penetrado en las células.



ANDREW SWIFT; FUENTE: "EMERGING THEMES IN ROTAVIRUS CELL ENTRY, GENOME ORGANIZATION, TRANSCRIPTION AND REPLICATION", POR HARIHAN JAYARAM, M. K. ESTES Y B. V. VENKATARM PRASAD EN *VIRUS RESEARCH*, VOL. 101; 2004

Al término de los ochenta, el final de las muertes por rotavirus parecía encontrarse a un paso. Pero entonces, en los ensayos realizados en Africa y en Perú se obtuvieron resultados contradictorios, desalentadores. Sin saber la causa de los problemas (aunque se conoce que una higiene deficiente, las infecciones no tratadas, la malnutrición y los parásitos afectan a la respuesta inmunitaria de un niño ante las vacunas), la compañía decidió posponer el programa del rotavirus.

Vuelta a la pizarra

Investigadores del Instituto Nacional de la Salud y del Instituto Wistar de Filadelfia buscaron una explicación del fracaso de la vacuna de RIT. Probablemente, la cepa bovina estaba demasiado atenuada, es decir, fuera demasiado débil para replicarse y conseguir una buena respuesta inmunitaria en condiciones extremas. Se abrieron otras líneas de trabajo. Albert Kapikian, del Instituto Nacional de la Salud, identificó una cepa vírica del mono *rhesus*; Fred Clark y Stanley Plotkin, de Wistar, identificaron otra cepa bovina que se podría replicar de forma más vigorosa. Se prepararon las cepas para ensayos clínicos. Se volvió a repetir la historia de éxitos y fracasos. Hubo de pasar tiempo antes de replantearse el problema.

En el ínterin, otros investigadores estaban desentrañando la estructura molecular del virus. Aunque en sección transversal presenta el aspecto de una rueda, el rotavirus consiste en una esfera formada por tres capas; contiene 11 segmentos de ARN de doble hebra, cada uno de los cuales corresponde a un gen que determina una proteína. Las proteínas pueden ser de dos tipos fundamentales: estructurales (componentes del virus) y no estructurales (sintetizadas en el interior de las células infectadas). Las proteínas víricas estructurales (PV) se numeran: PV1, PV2 y así sucesivamente, lo mismo que las proteínas no estructurales (PNE), que intervienen en la replicación del virus y en la alteración de la función intestinal.

La capa más externa, fundamental para la inducción de la respuesta inmunitaria en el huésped, ha centrado la atención durante el desarrollo de la vacuna. PV7 origina el aspecto grumoso de la superficie; la proteína PV4 forma las púas de la parte externa de la "rueda". PV6, la proteína más abundante del virus, se sitúa por debajo de PV7; participa en la producción de proteínas víricas en las células infectadas. La proteína no estructural PNS4, una toxina, puede intervenir en el proceso que causa la diarrea profusa.

Las proteínas se presentan en varias versiones. Las cepas distintas ofrecen mezclas proteicas diferentes. Cuando dos cepas víricas infectan una misma célula, sus segmentos génicos se reordenan y crean nuevas combinaciones, nuevas versiones del virus. Constantemente surgen nuevas variantes del virus, pero, como ocurre con la mayoría de las mutaciones, son pocas las que ofrecen ventajas para la supervivencia del mismo. En consecuencia, de las 42 cepas de rotavirus identificadas hasta la fecha según las combinaciones de sus variantes de PV7 y de PV4, sólo cuatro o cinco son las responsables de más del 90 por ciento de los casos de enfermedad en todo el mundo.

Sacando provecho de la capacidad natural del rotavirus para reordenar sus genes, Kapikian y Harry Greenberg desarrollaron un método para generar combinaciones que portasen características útiles para las vacunas sin causar la enfermedad en humanos. Fabricaron un virus reordenado en el que se combinaban 10 genes procedentes del rotavirus del mono (lo que le dotaba de la propiedad de atenuación) con un gen que codificaba una proteína de superficie, PV7, procedente de una cepa humana.

Kapikian y Greenberg construyeron tres combinaciones de este tipo (cada una con una versión distinta de la PV7 humana) y una formada exclusivamente a partir del virus del mono *rhesus*, con un cuarto tipo de PV7 que se encuentra en los rotavirus del mono y en los rotavirus humanos. Mezclaron los cuatro tipos de virus en una vacuna tetravalente, un cóctel diseñado para aportar protección contra las cuatro cepas más extendidas del rotavirus humano.

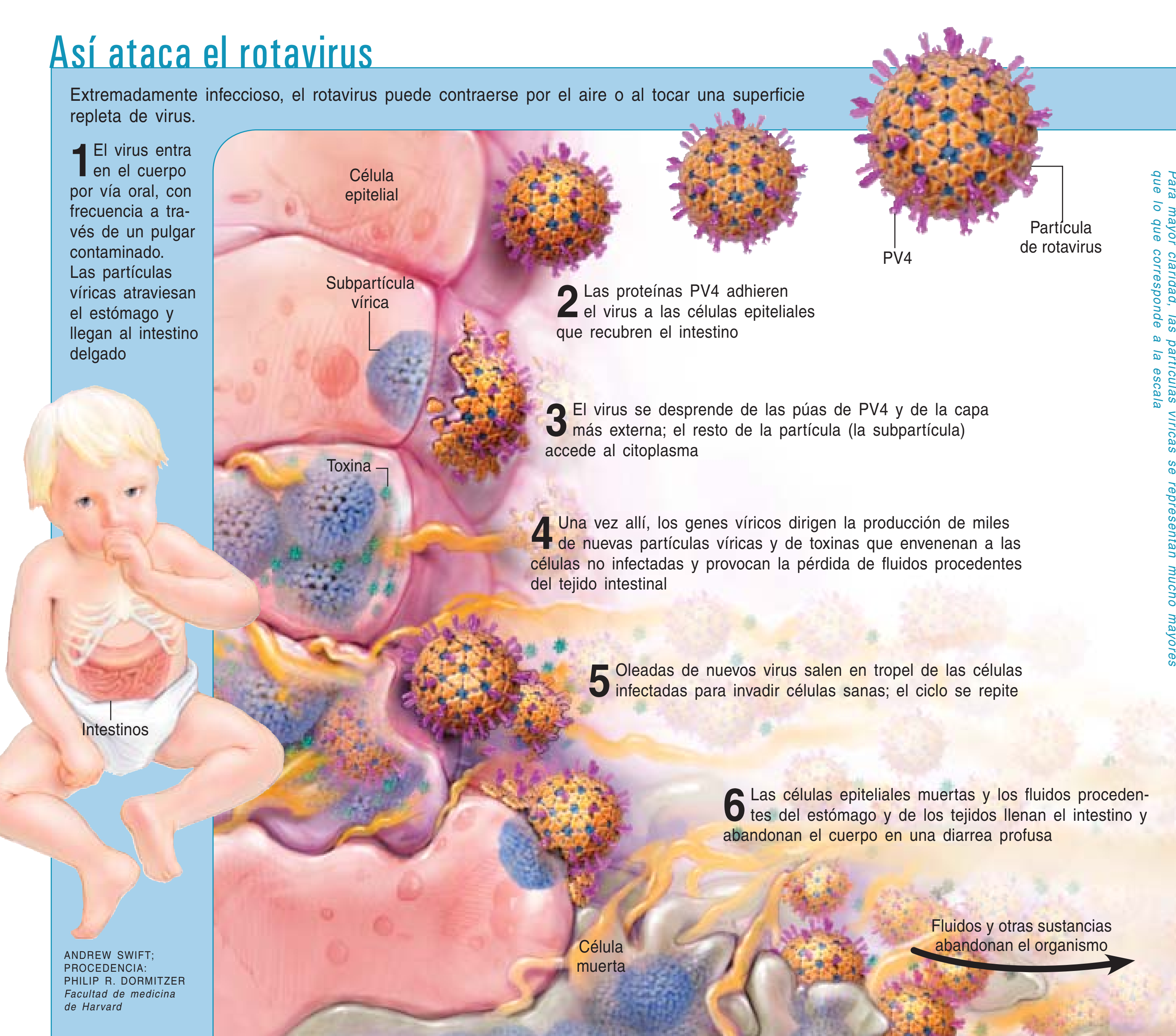
En 1991, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) concedió permiso a los laboratorios Wyeth Ayerst (posteriormente Wyeth Pharmaceuticals) para fabricar y ensayar esta vacuna, a la que denominaron RotaShield. En los cinco años siguientes, la compañía puso en marcha ensayos clínicos a gran escala en EE.UU., Finlandia y Venezuela: verificaron la seguridad de RotaShield, su capacidad para instar una respuesta inmunitaria protectora y la duración de su eficacia. En 1988, RotaShield obtuvo la licencia de la FDA y fue recomendada por el Comité Asesor sobre Prácticas de Inmunización del CDC, así como por la Academia Americana de Pediatría, para que formara parte de la inmunización rutinaria de la población infantil. Se estima que en los nueve meses subsiguientes un número superior a los 600.000 niños recibieron 1,2 millones de dosis de RotaShield.

Esos eran buenos tiempos. La vacuna tenía que salir de Estados Unidos y ensayarse en niños desnutridos de países en vías de desarrollo, donde las vacunas orales vivas contra otras enfermedades (poliomielitis y cólera, entre otras) resultaban menos eficaces. Además, la dosis era muy cara para la mayoría de los países pobres. Con todo, por primera vez, el mundo disponía de una herramienta con la que combatir al rotavirus. Nuestra alegría era desbordante.

Pero sobrevino el desastre. En 1999, varios niños sufrieron una complicación grave en las dos semanas posteriores a la vacunación: un segmento del intestino delgado se

Así ataca el rotavirus

Extremadamente infeccioso, el rotavirus puede contraerse por el aire o al tocar una superficie repleta de virus.



ANDREW SWIFT; PROCEDENCIA: PHILIP R. DORMITZER *Facultad de medicina de Harvard*

replegó en el interior de una zona cercana (del mismo modo que un segmento de un telescopio se acopla en el interior de otro), creando una obstrucción que se denomina intususcepción. Este cuadro provoca dolores insoportables; debe contrarrestarse rápidamente bien mediante un enema de aire o de fluido, bien mediante una intervención quirúrgica. En raras ocasiones, el intestino se perfora y el niño muere. El CDC, que estaba controlando la experiencia con RotaShield, mandó interrumpir de forma inmediata el programa de inmunización; con ello hundió una vacuna en cuyo lanzamiento se habían invertido 15 años y varios cientos de millones de dólares.

En un principio, la agencia estimó que la probabilidad era de una intususcepción por cada 2500 receptores de la vacuna. Se consideró inaceptable. Estudios posteriores redujeron esta probabilidad a una entre 11.000. Más tarde, Lone Simonsen, del Instituto Nacional de la Salud, estableció una correlación entre el riesgo y la edad: los niños menores de tres meses corrían menos peligro que los mayores. Si la vacuna se administrase sólo a los bebés, la probabilidad de una intususcepción se reduciría 10 veces, quizás a una por cada 30.000.

Los nuevos datos abrieron nuevos interrogantes. ¿Se podía aceptar el riesgo en los EE.UU., donde es frecuente que los niños ingresen en el hospital pero muy raro que mueran a causa del rotavirus? ¿Era más aceptable en los países en vías de desarrollo, donde uno de cada 200 niños muere de la infección de este virus? Si se pudiesen salvar 150 vidas por cada caso de intususcepción, ¿estaría justificado el riesgo? A la vista de estas estadísticas ¿era ético retener una vacuna que podría salvar medio millón de vidas cada año? O, con independencia del balance de beneficios y riesgos, ¿era ético comercializar en países pobres una vacuna cuyo uso se había prohibido en los EE.UU.?

El CDC y la OMS convocaron una reunión de políticos de los países en vías de desarrollo. Tras una acalorada discusión, la ciencia se doblegó a la política. Tal y como dijo un alto cargo del gobierno indio: "Sé que esta vacuna salvaría a 100.000 niños en mi país. Pero cuando apareciese el primer caso de obstrucción intestinal, no se me perdonaría el haber permitido el uso de una vacuna rechazada en los EE.UU.".

De nuevo tras la pista

El estudio de la conexión entre la vacunación y la intususcepción prosiguió. Los niños que contrajeron el rotavirus de forma natural no presentaban una mayor incidencia de la obstrucción que los demás. Entonces, ¿por qué tendría la vacunación *per se* que incrementar el riesgo? Algunos comenzaron a sospechar que se trataba de un problema específico de las cepas del mono *rhesus*, no de un efecto común a todas las vacunas orales vivas contra el rotavirus.

Dos fabricantes de vacunas se propusieron resolver el problema de la intususcepción. Y se concentraron en el rotavirus. GlaxoSmithKline desempolvó su programa y avanzó hacia la fabricación de una nueva vacuna monovalente obtenida enteramente a partir de una única cepa humana atenuada. Dado que la infección natural por rotavirus no guardaba relación con la intususcepción, su vacuna, argumentaban, no incrementaría el riesgo de sufrir tamaña complicación. Además, la compañía seleccionaría para su estudio sólo a niños con edades comprendidas entre seis y trece semanas, una etapa en la que la intususcepción natural es rara.

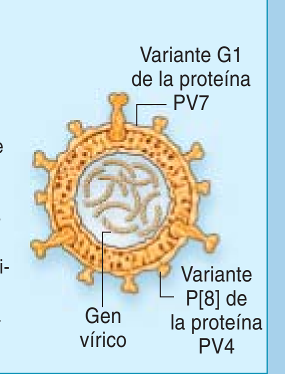
Al propio tiempo, los laboratorios Merck desarrollaron una vacuna pentavalente obtenida a partir de cinco cepas resultantes de la combinación de virus humanos y bovinos que, en conjunto, irían dirigidas contra las cepas mayoritarias del rotavirus. En Merck sabían que las cepas bovinas ni crecían ni se replicaban tan bien como la cepa del mono *rhesus*; tampoco provocaban la fiebre de poca intensidad que muchos niños padecían tras haber sido inmunizados con la vacuna del mono *rhesus*. Asimismo, los ensayos clínicos se limitarían a bebés de entre seis y doce semanas de vida.

Vacunas contra el rotavirus

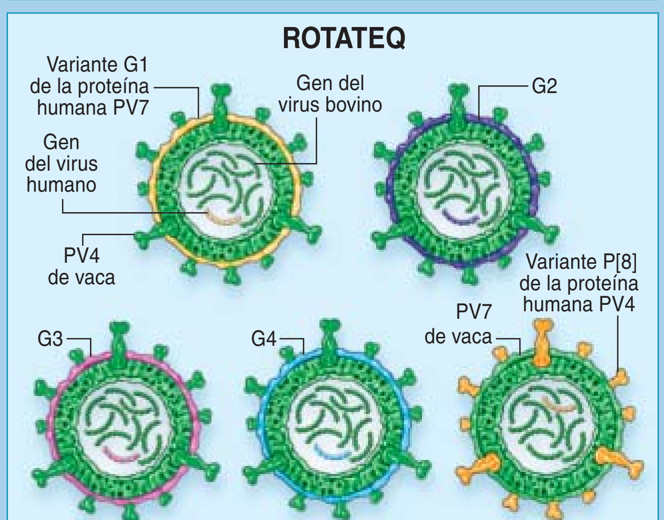
En la figura inferior se muestran dos vacunas contra el rotavirus que, en ensayos clínicos recientes a gran escala, han demostrado una elevada eficacia.

ROTARIX

Fabricada por GlaxoSmithKlein, la vacuna Rotarix consta de una única cepa de un rotavirus que infecta a los humanos; confiere protección contra multitud de cepas. La vacuna contiene versiones comunes de PV7 y PV4 (G1 y P[8], respectivamente). Dado que un virus de este tipo podría provocar enfermedades si fuese completamente funcional, se debilitó mediante un método de cultivo celular estándar que evita que provoque los síntomas sin impedir que se replique en cuantía suficiente para desencadenar una respuesta inmunitaria.



ROTATEQ



Fabricada por Merck, Rotateq contiene cinco tipos de virus genéticamente distintos, resultantes de la reorganización de sus genes. Estas reorganizaciones se obtienen mediante la combinación de 10 genes del rotavirus de la vaca (*verde*) con uno seleccionado de entre cinco genes de rotavirus humanos (*otros colores*); se generan virus cuasibovinos, si bien exhiben sobre su superficie una proteína procedente del virus humano. Cuatro de las reorganizaciones contienen un gen que codifica una variante de la PV7 humana (G1, G2, G3 o G4); la quinta porta el gen de la variante P[8] de la PV4 humana con forma de púa. El resultado final es una vacuna pentavalente que protege contra las cuatro cepas de rotavirus humano más extendidas; contiene demasiados genes del virus bovino para provocar la enfermedad en humanos.

ANDREW SWIFT

Ambas compañías farmacéuticas se reunieron con la FDA para informarle acerca de sus planes sobre ensayos clínicos. La FDA, queriendo asegurarse de que la siguiente generación de vacunas contra el rotavirus fuese más segura que el RotaShield, insistió en que los ensayos abarcasen una muestra suficiente para detectar cualquier tipo de riesgo, por pequeño que fuese.

Se estableció una población inicial de 60.000 participantes por cada ensayo, lo que las convertía en las pruebas de seguridad más amplias y más caras de cuantas se habían efectuado con una vacuna antes de obtener la licencia. Además de lo costosos que resultarían los ensayos, el propio compromiso adquirido era arriesgado (cualquiera de ellos se paralizaría de inmediato en el caso de que la tasa de intususcepción de los bebés vacunados excediese a la de los no vacunados). Los investigadores acometieron su trabajo con justificada inquietud.

Seis años después de la debacle de la intususcepción, la apuesta por el rotavirus comienza ahora a ser rentable. GlaxoSmithKlein y Merck han completado sus ensayos clínicos: los resultados de ambas vacunas son esperanzadores. Ofrecen entre un 85 y un 98 por ciento de protección frente a la diarrea grave causada por el rotavirus. Además, los niños vacunados no muestran mayores índices de intususcepción que los no vacunados.

Rotarix, la vacuna de GlaxoSmithKlein, se ensayó sobre todo en Iberoamérica. Desde 2004, se ha aprobado en más de 20 países; en fecha reciente, en la Unión Europea; en los EE.UU. se está revisando. Merck, en cambio, se concentró en el mercado estadounidense. Quería comprobar que su vacuna, RotaTeq, es segura en los EE.UU. antes de introducirla en otros lugares. La compañía ha obtenido la aprobación en México y en los EE.UU.; espera conseguirla en Europa este año, un preludio para la introducción de la vacuna en multitud de países.

También los fabricantes de vacunas de los países en vías de desarrollo están interesados en el rotavirus. A diferencia de las vacunas que requieren refinadas técnicas de bioingeniería, una vacuna contra el rotavirus, lo mismo que la antipoliomielitis, se fabrica mediante métodos tradicionales de cultivo de tejidos; se encuentra, pues, al alcance de laboratorios de orden inferior. Hoy en día, más de 10 fabricantes de India, China, Indonesia y Brasil están preparando vacunas orales vivas contra los rotavirus. Una compañía china ya ha conseguido la licencia para vender su producto.

Desafíos futuros

La perspectiva de nuevas vacunas alimenta la esperanza de que la amenaza del rotavirus pueda desaparecer pronto. Pero todavía quedan obstáculos. Puesto que muchos políticos de los países en vías de desarrollo ni siquiera han oído hablar del rotavirus, no llegan a comprender sus graves consecuencias. El trabajo de vigilancia llevado a cabo en más de 40 países por Joseph Bresee y Umesh D. Parashar, del CDC, junto con la OMS y el Programa de Técnicas Adecuadas para la Salud, está empezando a proporcionar datos de gran utilidad para quienes deban tomar la decisión de aplicar o no las vacunas en su país. Además, sigue pendiente la confirmación de la seguridad y eficacia de las vacunas orales vivas en las regiones más pobres. Por si fuese poco, las vacunas (cuyos costes de desarrollo ascienden a varios cientos de millones de dólares cada una) deben ser asequibles para los responsables de los 135 millones de niños que cada año nacen en el mundo.



3. EL PEQUEÑO ANDREW participó en un estudio a gran escala que evaluó la seguridad y la eficacia de la vacuna RotaTeq.

Con todo, el proceso se está acelerando. Esperamos que, de aquí a diez años, esta causa mayoritaria de diarrea y principal asesina de niños en los países pobres quedará eliminada por la medida de salud pública más rentable de que disponemos en la actualidad: la inmunización. Con la ayuda de una comunidad global comprometida en el empeño, el rotavirus se sumará pronto a la poliomielitis, la viruela, la difteria y otros microorganismos que las vacunas han erradicado, convirtiéndolos en marginales. Los epidemiólogos esperan que el desconocimiento que tradicionalmente ha caracterizado a esta enfermedad vuelva a definirla, de forma que su recobrado anonimato constituya un auténtico testamento del poder de la vacunación.

El autor

Roger I. Glass dirige la sección de gastroenteritis vírica en el Centro para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC). Imparte clases de pediatría y salud internacional en la Universidad Emory. Sus investigaciones se centran en la función de las vacunas en la prevención de enfermedades. En 1998 recibió el premio Pasteur de manos de la Iniciativa para la Vacunación Infantil por sus trabajos en pro de la vacuna contra el rotavirus. El autor agradece a Philip R. Dormitzer, de la Facultad de Medicina de Harvard, su desinteresada ayuda en la elaboración de los gráficos incluidos en este artículo.

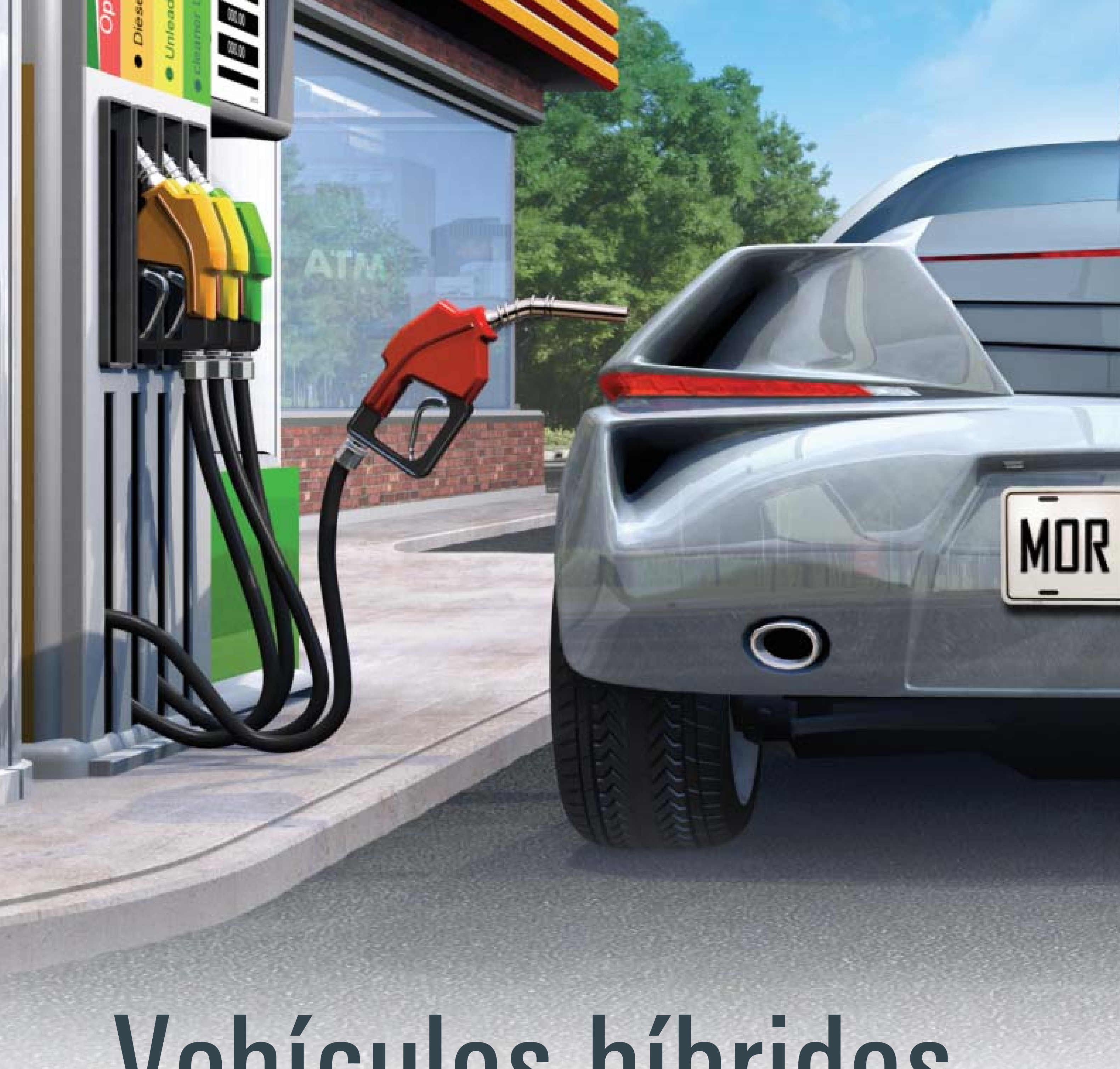
Bibliografía complementaria

GLOBAL ILLNESS AND DEATHS CAUSED BY ROTAVIRUS DISEASE IN CHILDREN. U. D. Parashar y col. en *Emerging Infectious Diseases*, vol. 9, n.º 5, págs. 565-572; mayo, 2003.

THE FUTURE OF ROTAVIRUS VACCINES: A MAJOR SETBACK LEADS TO NEW OPPORTUNITIES. VIEWPOINT. R. Glass y col. en *Lancet*, vol. 363, n.º 9420, pág. 1547-1550; mayo, 2004.

SAFETY AND EFFICACY OF AN ATTENUATED VACCINE AGAINST SEVERE ROTAVIRUS GASTROENTERITIS. G. Ruiz Palacios y col. en *New England Journal of Medicine*, vol. 354, págs. 11-22; 5 de enero, 2006.

SAFETY AND EFFICACY OF A PENTAVALENT HUMAN-BOVINE (WC3) REASSORTANT ROTAVIRUS VACCINE. T. Vesikari y col. en *New England Journal of Medicine*, vol. 354, págs. 23-32; 5 de enero, 2006.



Vehículos híbridos

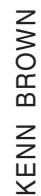
Mientras crece la aceptación de los vehículos híbridos de gasolina y electricidad, parcos en combustible, se vislumbra ya una nueva generación de híbridos más limpios y económicos

Joseph J. Romm y Andrew A. Frank

1. LOS HIBRIDOS ENCHUFABLES que utilizan gasolina y electricidad reducirán al mínimo las emisiones globales de dióxido de carbono en el futuro, especialmente cuando la generación de electricidad se torne menos emisora de ese gas.

Con las subidas recientes del precio de la gasolina, el interés por los vehículos híbridos, que combinan un motor de combustión interna corriente con un motor eléctrico alimentado por batería, ha ido creciendo. Un coche medio recorre más de 10 kilómetros por litro de gasolina; uno híbrido, como el Toyota Prius, con una conducción adecuada, recorrerá entre vez y media y más de dos veces, según los casos, esa distancia. Las ventas anuales de híbridos se doblaron en Estados Unidos de 2004 a 2005, hasta las 200.000 unidades, y se espera que alcancen el medio millón para 2010. Hacia el 2020, la mayoría quizá de los modelos nuevos ofrecerá la opción de la propulsión híbrida.

Para entonces, la siguiente generación, la de los híbridos “enchufables”, aprovechará mejor el combustible y ofrecerá otras ventajas: la recarga económica de baterías en horas nocturnas sin más que enchufar una clavija a una toma eléctrica de 120 volt en el hogar o el trabajo, muy pocas visitas a las gasolineras al año e incluso la posibilidad de revender la energía sobrante a la red eléctrica. Además de las ventajas para el consumidor, los nuevos coches enchufables contribuirán a reducir la emisión de gases de invernadero, que ya no emitirán millones de tubos de escape, sino las plantas generadoras de electricidad. Estas centrales, hoy alimentadas por carbón o gas natural, en el futuro deberían utilizar fuentes de energía renovables (viento, rayos solares) o incluso sistemas avanzados que quemen combustibles fósiles pero capturen el dióxido de carbono y lo almacenen bajo tierra.



Para apreciar hacia dónde va el vehículo híbrido, tenemos que recordar las etapas anteriores de la evolución del automóvil. A lo largo de cien años, casi todos los coches han sido propulsados por un motor de combustión interna alimentado con gasolina o gasóleo. Los ingenieros de automoción soñaron, ya desde principios del siglo XX, en acoplar ese motor a un motor eléctrico de baterías a fin de aumentar la potencia y ahorrar combustible, pero abandonaron la idea al fabricarse motores de combustión cada vez más potentes que no necesitaban suplementos. El combustible era barato (sobre todo en Estados Unidos) y abundante; una máquina ávida de gasolina no suponía un problema. Pero tras las crisis del petróleo en la década de los setenta, se comprendió que para mejorar el rendimiento de la gasolina había que sacrificar el tamaño, el peso y las prestaciones. Los coches menguaron durante algún tiempo, pero pronto crecieron de nuevo, al igual que su sed de gasolina. El reciente encarecimiento del petróleo vuelve a colocar en primer plano el aprovechamiento del combustible.

Los vehículos híbridos actuales combinan una electrónica de potencia muy avanzada y controles informatizados con trenes propulsores de combustión interna y eléctricos a fin de ahorrar en combustible y reducir las emisiones, amén de conseguir una aceleración y una autonomía mayores. Estos vehículos pueden utilizar motores de combustión más pequeños que un automóvil ordinario porque el sistema de batería y motor eléctrico proporciona la potencia adicional que se necesita para acelerar o para ascender por pendientes pronunciadas.

Cualquier técnica que ahorre combustible valdría para aumentar la potencia. Con las mejoras de rendimiento que aportan los trenes de propulsión híbridos, y con las aceleraciones que proporcionan sus motores eléctricos, se logran potencias mayores y ahorros de combustible. El Ford Escape Híbrido, por ejemplo, recorre más kilómetros por litro con parecida potencia. Otros vehículos, como el Toyota Highlander Híbrido 4×4, utilizan sistemas híbridos para conseguir modestos incrementos en ambas categorías.

Dado el gasto adicional que suponen el motor eléctrico, la batería de gran tamaño y la electrónica de potencia asociada, resulta inevitable que un coche híbrido sea más caro que otro corriente. El extra asciende a unos miles de euros. El motor eléctrico y la batería aumentan el peso total —un 5 por ciento en el Honda Accord Híbrido, por ejemplo—, lo que recorta ligeramente el rendimiento del combustible.

Si recorre 24.000 kilómetros al año con gasolina a un euro por litro, una técnica híbrida que eleve el rendimiento de 12 kilómetros por litro a 18 le ahorrará al usuario algo menos de 700 euros por año. Tardaría, pues, varios años en amortizar el precio superior del coche híbrido, suponiendo que no le asigne algún valor a la mayor autonomía.

No obstante, si continúan subiendo los precios del combustible, el superior rendimiento del vehículo híbrido acortará notablemente el período de amortización. Paralelamente, cabe esperar que la fabricación a mayor escala y los perfeccionamientos en las baterías reduzcan los costes de producción. Entre 1997 y 2004, el precio de las baterías de níquel e hidruro metálico bajó a la mitad y también su peso. Aun así, las baterías siguen representando más del 50 por ciento del exceso de coste de los híbridos actuales. Toyota, por hablar sólo de un fabricante, proyecta ofrecer versiones híbridas de sus modelos y vender un millón de vehículos de ese tipo por año en los diez próximos. Crecerá así el volumen de producción, con la consiguiente caída de los costes.

Resumen/Vehículos híbridos

- Un número aún pequeño, pero creciente, de coches y camiones aplica una técnica híbrida que combina los motores eléctricos con los de combustión de petróleo para ahorrar energía. Su evolución procede con rapidez.
- Los trenes de tracción híbrida encarecen en varios miles de euros un vehículo; los propietarios tardan algunos años en recuperar esa inversión adicional mediante el ahorro en combustible. Pero los progresos en la técnica de baterías y el mayor volumen de fabricación previsible pueden reducir notablemente el suplemento a pagar por un vehículo híbrido.
- Disponer de baterías de mejor calidad debería fomentar la comercialización de vehículos híbridos enchufables, que recargarían sus baterías conectados a la red eléctrica, sobre todo en horas nocturnas, para aprovechar las tarifas más económicas. En la medida en que las centrales eléctricas se alimenten de carbón, energía nuclear y energía hidráulica, este cambio reducirá la dependencia del transporte de las importaciones de crudo.

Tipos de híbridos

Las diferencias entre los diseños de híbridos dependen del grado de economía de combustible que se desee alcanzar. En un híbrido "integral" se aplican múltiples técnicas para ahorrar gasolina; un híbrido "moderado" utiliza menos estrategias de ahorro por no añadir costes; el híbrido "micro" se limita a apagar el motor de combustión durante las paradas para conseguir una modesta mejora del rendimiento.

Un híbrido integral, como el Toyota Prius, puede ahorrar alrededor de un cincuenta por ciento del combustible que gastarían muchos modelos comunes. Los ahorros más notables provienen del frenado regenerativo, que convierte en energía eléctrica almacenable gran parte de la que acabaría por perderse en forma de calor. Igual que el motor eléctrico transforma la energía eléctrica almacenada en la batería en un par que hace girar las ruedas y da tracción al vehículo, el proceso puede invertirse para que el par creado al frenar un coche genere electricidad que se acumule en una batería.

Los frecuentes arranques y paradas de la conducción urbana ofrecen una óptima oportunidad para regenerar la energía de frenado, pero el proceso se da también en las subidas y bajadas por terrenos accidentados. Los vehículos híbridos actuales recogen por término medio la mitad de la energía total invertida en el frenado. En el futuro, unas baterías de mejor calidad y unos sistemas más refinados permitirán que los coches recuperen una parte aún mayor de la energía disponible.

LAS VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES DE LOS AUTOMOVILES HIBRIDOS

Los vehículos híbridos, que combinan un motor de gasolina y un motor eléctrico, aplican estrategias diversas para ahorrar energía. Representamos aquí los principales elementos de un híbrido "integral", como el Toyota Prius, que emplea todas estas técnicas. Los híbridos integrales pueden ahorrar hasta el 60 por ciento de combustible, mientras que los híbridos "moderados" economizan un 35 por ciento y los "micro" alrededor del 10 por ciento.

COMPONENTES ELECTRICOS QUE AHORRAN ENERGIA

En los coches tradicionales, la climatización, la dirección asistida, las bombas de agua y de aceite y los ventiladores extraen energía mecánica directamente de las partes giratorias del motor a través de correas de transmisión. Sin embargo, estos componentes eléctricos trabajan mejor a tensiones de batería fijas, mientras que los sistemas mecánicos tienen que adaptarse a velocidades de motor variables. Al ser mayores, las baterías de los coches híbridos alimentan directamente esos componentes y así ahorran energía.

MOTOR DISEÑADO PARA APAGARSE EN LAS PARADAS

Los motores tradicionales resultan muy ineficientes cuando se está parado ante un semáforo o con cargas muy pequeñas. Los híbridos recortan estas pérdidas apagando el motor y dejando la propulsión del vehículo a cargo del motor eléctrico y la batería.

CAPTACION DE ENERGIA DESPERDICIADA

En buena medida, el ahorro de combustible proviene del frenado regenerativo, que recupera parte de la energía que se perdería en el calor producido por el rozamiento al aminorar la marcha. El motor eléctrico se invierte y funciona como generador, convirtiendo la energía del giro de las ruedas en electricidad que carga la batería.

CAMBIO DE TIPO DE MOTOR

Ciertos fabricantes sustituyen el motor de gasolina de ciclo Otto por el de ciclo Atkinson, de mayor rendimiento en el consumo de combustible; su uso restringido se debe a que produce una potencia menor. El motor eléctrico del coche híbrido compensa esta pérdida de fuerza.

REDUCCION DEL TAMAÑO DEL MOTOR

Los motores de combustión interna funcionan mejor a unas pocas velocidades y niveles de par motor, pero en la conducción cotidiana un coche normal ha de funcionar en un amplio margen de potencias.

EN EL FUTURO: ENERGIA POR EL ENCHUFE

Los híbridos de la siguiente generación portarán una batería mayor, que podrá enchufarse a través de un cable eléctrico a una toma fija para que se recargue durante la noche, cuando las compañías eléctricas rebajan sus tarifas. El conductor medio contará así con una fuente de energía menos costosa y más limpia.

TONY RANDAZZO

Como todas las máquinas, los motores de combustión interna funcionan con máxima eficacia dentro de un estrecho margen de pares y velocidades. Puesto que la batería y el motor eléctrico del vehículo híbrido proporcionan el empuje adicional requerido para acelerar o subir pendientes, puede reducirse el tamaño del motor de combustión y a la vez cabe optimizarlo para que funcione sólo en los puntos donde su rendimiento operativo es alto y, por lo tanto, gasta mucho menos combustible. Medios electrónicos ponen en funcionamiento el motor eléctrico cuando se necesita inyectar potencia suplementaria.

Ciertos fabricantes de híbridos integrales, como Toyota y Ford, han sustituido el motor de ciclo Otto que lleva la mayoría de los coches de gasolina por el motor de ciclo Atkinson, más ahorrativo con el combustible. Un motor de ciclo Atkinson moderno consigue, mediante controles electrónicos y sincronización de las válvulas de admisión, una mayor expansión de la mezcla de aire y combustible y, por tanto, un mayor rendimiento energético del combustible. En el pasado, el ciclo Atkinson se había utilizado sólo en raras ocasiones, ya que la principal economía de combustible corría a expensas de la potencia. Ahora, el motor eléctrico del híbrido compensa la pérdida de potencia. Por autopista, la combinación de un motor Atkinson y la energía regenerada de las frenadas puede hacer que el rendimiento total del sistema híbrido supere al de un motor diésel moderno, el mejor motor de combustión interna en este aspecto.



2. LOS HIBRIDOS DIESEL-ELECTRICOS, como este prototipo Ford Reflex, pueden recorrer sin repostar distancias mayores que los de gasolina-eléctricos. Se espera que el Ford Reflex alcance los 27,5 kilómetros por litro de combustible diésel; además, incorpora en los faros y luces traseras paneles solares que generan energía auxiliar para la batería.

FORD MOTOR COMPANY

Los vehículos híbridos pueden salvar otra deficiencia de diseño de los automóviles tradicionales. En éstos, los sistemas de climatización, dirección asistida, agua, bomba de aceite, ventilación y otros que consumen energía se gobiernan directamente desde el motor de gasolina. La gran batería del híbrido, combinada con nuevos circuitos electrónicos de potencia de coste reducido, controla estos componentes, de alto rendimiento, enteramente eléctricos. En un día caluroso de verano, la unidad de climatización accionada por medios eléctricos consumirá un 20 por ciento menos de energía que un sistema controlado por el motor.

Otro notable ahorro de combustible en un vehículo híbrido integral deriva de su capacidad de funcionar exclusivamente con el motor eléctrico y las baterías, sin el motor de combustión. Puede así utilizarse la propulsión eléctrica para economizar el combustible que de otro modo se consumiría en los períodos de parada o de marcha lenta.

Los trenes de propulsión híbrida "moderada", como el sistema integrado asistido por motor eléctrico de los modelos Insight y Civic de Honda, así como el nuevo Accord, proporcionan un ahorro de combustible de hasta el 35 por ciento. Además de la función de arranque y parada, el motor eléctrico de este tipo de híbridos capta parte de la energía de frenado y da al motor un impulso adicional cuando se acelera.

En un híbrido micro, también llamado de arranque y parada, como los de General Motors, el motor de gasolina se apaga cuando el coche se detiene y un generador de arranque lo enciende instantáneamente en cuanto el conductor pisa el acelerador. Este tipo de vehículo, que utiliza motores eléctricos para gobernar los accesorios pero no las ruedas, mejora en un 10 por ciento el rendimiento en la conducción por ciudad; en carretera no presenta grandes diferencias con un coche corriente.

El imperio de los híbridos enchufables

Los híbridos ofrecen una ventaja que seguramente se apreciará cada vez más: su mejor utilización de la gasolina disminuye las emisiones de dióxido de carbono, el principal gas de efecto invernadero. Son muchos los países industrializados que ya han endurecido sus normas de economía de combustible para reducir las emisiones de dióxido de carbono. (Estas iniciativas a veces tropiezan con obstáculos: los fabricantes están litigando contra las normas aprobadas en California, que obligarían a recortar en un 30 por ciento las emisiones de dióxido de carbono en los modelos de 2016.)

Los vehículos eléctricos híbridos enchufables reúnen lo mejor de la propulsión eléctrica y la híbrida. Pueden funcionar íntegramente en modo eléctrico o en modo híbrido, y reducen todavía más las emisiones y el consumo de petróleo. Se alimentarían en parte con electricidad generada en centrales locales, lo que disminuiría la dependencia nacional del petróleo. Ofrecerían a las empresas eléctricas un mercado firme para la energía producida fuera de horas punta y a los conductores, una fuente de energía para sus vehículos más limpia y mucho más barata. A semejanza del híbrido normal, el enchufable puede consumir combustible líquido cuando haya de hacer largos recorridos, con sólo una parada breve para repostar. Por añadidura, estos híbridos enchufables no deberían ser mucho más complejos, pesados o caros que los actuales. Por dos razones: sus motores de combustión interna se achicarían a medida que se

Los modelos híbridos de 2006

Hoy se ofrecen a la venta automóviles de turismo, 4×4 y camionetas de reparto basados en sistemas híbridos eléctricos. Algunos consiguen grandes economías de combustible, otros sacrifican parte de los ahorros para mejorar las prestaciones y otros presentan muy escasas ventajas en su consumo. Se han supuesto recorridos del 45 por ciento en carretera, 55 por ciento en ciudad, 24.000 kilómetros anuales y un precio de 1 euro por litro de gasolina normal.

MARCA, MODELO Y TIPO	TREN MOTOR	L/100 KM COMBINADO	AUTONOMIA	COSTE DE COMBUSTIBLE/ AÑO	EMISIONES CO_2/AÑO
HONDA INSIGHT: DOS PLAZAS	Motor de combustión interna de 3 cilindros, 1,0 litro, transmisión variable continua (CVT) automática	4,2	850 km	1013 €	3,5 toneladas
HONDA CIVIC HIBRIDO: COCHE COMPACTO	Motor de combustión interna de 4 cilindros, 1,3 litros, CVT automática	4,7	880 km	1135 €	3,9 toneladas
TOYOTA PRIUS: COCHE MEDIO	Motor de combustión interna de 4 cilindros, 1,3 litros, CVT automática	4,3	940 km	1032 €	3,5 toneladas
HONDA ACCORD: HIBRIDO: COCHE MEDIO	Motor de combustión interna de 6 cilindros, 3,0 litros, transmisión automática	8,4	690 km	2028 €	6,8 toneladas
FORD ESCAPE HIBRIDO: 4x4	Motor de combustión interna de 4 cilindros, 2,3 litros, transmisión CVT, 4x4	7,6	670 km	1831 €	6,2 toneladas
LEXUS RX 400H: 4x4	Motor de combustión interna de 6 cilindros, 3,3 litros, CVT automática, 4x4	8,2	720 km	1958 €	6,6 toneladas
MERCURY MARINER HIBRIDO: 4x4	Motor de combustión interna de 4 cilindros, 2,3 litros, CVT automática, 4x4	7,6	670 km	1831 €	6,2 toneladas
TOYOTA HIGHLANDER HIBRIDO: 4x4	Motor de combustión interna de 6 cilindros, 3,3 litros, CVT automática, 4x4	8,2	800 km	1958 €	6,6 toneladas
CHEVROLET SILVERADO HIBRIDO: CAMIONETA	Motor de combustión interna de 8 cilindros, 5,3 litros, transmisión automática, 4x4	12,4	720 km	2988 €	9,9 toneladas
GMC SIERRA HIBRIDO: CAMIONETA	Motor de combustión interna de 8 cilindros, 5,3 litros, transmisión automática, 4x4	12,4	720 km	2988 €	9,9 toneladas

Estos cálculos se basan en cifras dadas por la EPA. En la realidad, los valores del ahorro de combustible pueden ser algo inferiores (véase el recuadro "Híbridos en el mundo real").

AMERICAN HONDA MOTOR CO., INC. (*Insight, Civic y Accord*); TOYOTA MOTORS SALES USA, INC. (*Prius y Highlander*); FORD MOTOR COMPANY (*Escape y Mercury Mariner*); LEXUS, DIVISION DE TOYOTA MOTOR SALES USA, INC. (*Lexus*); GENERAL MOTORS CORPORATION (*Silverado y Sierra*)

agrandasen las baterías y motores eléctricos, y los precios de los componentes electrónicos y baterías están cayendo sin cesar.

Un automóvil ordinario gasta unos 8 céntimos de euro por kilómetro en funcionamiento (a un euro el litro y unos ocho litros por cien kilómetros). Un híbrido enchufable podría operar a poco más de un par de céntimos por kilómetro con tracción eléctrica, si la tarifa media residencial es de unos 8 céntimos el kilowatt-hora. Y dado que buena parte de los coches recorren menos de unas decenas de kilómetros al día, el uso de un modelo enchufable cuya batería le diese una autonomía de 30 kilómetros podría reducir hasta en un 60 por ciento el consumo de combustibles derivados del petróleo. Incluso un conductor que a diario recorriese una gran distancia hasta su trabajo en un híbrido enchufable podría utilizar durante la mayor parte del día la energía acumulada en una batería perfeccionada, que una toma de pared habría cargado, con menor coste, la noche anterior y que se recargaría parcialmente durante las horas de trabajo.



3. EL PRIMER HIBRIDO ENCHUFABLE de un gran fabricante apareció en 2005: la versión híbrida de la furgoneta Sprinter, un prototipo de Mercedes Benz (*arriba*). La portezuela abierta (*abajo*) muestra la toma eléctrica con la que se conecta la batería a un generador y se la recarga en horas nocturnas.

DAIMLERCHRYSLER

Que la batería de un híbrido enchufable sea mayor y esté acoplada a un motor eléctrico más potente permite reducir considerablemente el motor de combustión y otros sistemas mecánicos asociados. En la Universidad de California en Davis se han construido prototipos de híbridos enchufables que recorren 100 kilómetros impulsados sólo por la tracción eléctrica y cuyos motores de combustión ni siquiera llegan a la mitad de los normales. Están en pruebas ocho sedanes y cuatro 4×4. En 2005 Daimler Chrysler presentó los primeros prototipos de híbrido enchufable construidos por una firma poderosa: una versión híbrida de su furgoneta Mercedes Benz Sprinter. La Sprinter modificada posee un motor de combustión de 143 caballos de vapor y un motor eléctrico de 120 caballos. Puede recorrer unos 30 kilómetros cuando sólo actúa el motor eléctrico, consume un 40 por ciento menos de gasolina que una Sprinter ordinaria y su aceleración es mayor. Hasta la fecha sólo han circulado unas pocas Sprinter híbridas enchufables.

A medida que avanza la técnica de las baterías, cabe esperar el desarrollo de vehículos híbridos enchufables que consuman bastante menos gasolina que los tradicionales. Con el depósito de gasolina lleno y a plena carga de batería, la autonomía en ciudad debería ser de 1000 a 1600 kilómetros. El tamaño de los sistemas de propulsión de cada vehículo dependerá de las distancias que necesite recorrer su propietario. Así, por ejemplo, para ir a trabajar lejos convendría adquirir un coche enchufable con una batería mayor, si bien cabe esperar que una autonomía de 30 kilómetros con medios puramente eléctricos satisfaga a los usuarios.

El menor gasto de combustible de estos vehículos llegará a compensar su elevado precio en el supuesto de que continúe el firme avance de la técnica de las baterías y desciendan los costes. Las baterías electroquímicas de larga duración cuestan unos 8000 euros por unidad. Creemos que terminará por haber baterías de níquel e hidruro metálico o de iones de litio que proporcionarán energía suficiente para cubrir al menos 30 kilómetros y cuyo precio, sin embargo, no llegará a los 2500 euros. Con el tiempo se espera que la vida útil de estas baterías pueda ampliarse hasta que sobrepase los 15 años y el cuarto de millón de kilómetros.

Tras algunas modificaciones en los motores de combustión interna, los híbridos enchufables podrían funcionar con una mezcla del 15 por ciento de gasolina y el 85 por ciento de un combustible orgánico, como el etanol celulósico (no obtenido de cereales, sino de desechos agrícolas y cultivos especializados para la producción de energía). Estos vehículos podrían recorrer unos 1000 kilómetros con una mezcla de 5 litros de gasolina y 25 litros de etanol; constituyen una estrategia a largo plazo para abordar el inevitable techo y posterior descenso de las reservas de crudo mundiales.

Los híbridos enchufables ofrecen otras ventajas singulares. Como pueden conectarse a la red eléctrica, les es posible aprovechar las tarifas nocturnas, mucho más reducidas. Las compañías eléctricas disponen de energía en exceso, sobre todo en las noches de verano, cuando no trabajan los acondicionadores de aire. Se podrían cargar entonces las baterías de estos vehículos y en las horas diurnas de máxima carga devolver a la red energía eléctrica o prestarle servicios de regulación de la tensión. Tal vez los propietarios de automóviles puedan optar a rebajas o compensaciones de las empresas eléctricas por esos conceptos. Un grupo de la Universidad de Delaware ha calculado que el valor potencial de tales servicios es apreciable, del orden de 2500 euros al año; subvencionaría la compra de un híbrido enchufable o de su batería. Cabe imaginar que una compañía eléctrica alquilase a un particular o a una empresa un vehículo híbrido enchufable, con el compromiso de que lo dejara conectado cuando no circulara por carretera y permitiese que la compañía controlara la carga y descarga de la

Híbridos en el mundo real

Algunos propietarios de vehículos híbridos se sienten decepcionados porque su coche no ha alcanzado el rendimiento kilométrico prometido. Como la mayoría de los coches, los híbridos suelen quedar por debajo de los valores señalados. Varios factores explican este fallo. Veámoslo tomando como ejemplo las pruebas que efectúa la EPA (la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).

Procedimientos de prueba defectuosos. El ciclo de formas de conducción utilizado por la EPA no refleja la experiencia real ni el estado de las carreteras porque supone maneras de conducir no habituales. Por ejemplo, la velocidad máxima de prueba en autopista es de menos de 100 kilómetros por hora, cifra que a menudo sobrepasa un conductor medio.

Aumento estacional de las pérdidas de rendimiento. En híbridos como el Toyota Prius, el programa informático decide cuándo ha de funcionar el motor de combustión, cuándo ha de funcionar el motor eléctrico y cuándo hay que recargar la batería. En invierno, la calefacción interfiere con la optimización que proporciona el programa, puesto que obliga a funcionar más veces al motor de combustión, lo que rebaja el rendimiento del combustible más que en los vehículos ordinarios. Es inevitable que en los climas nórdicos el rendimiento de los híbridos baje mucho con respecto a los valores dados por la EPA, que se han medido a temperaturas de 20 a 30 grados.

Diseño híbrido y conducción. Como los híbridos dependen de la acción regeneradora del frenado, su rendimiento kilométrico es mucho más sensible a la conducción, Si ésta se acomoda a las particularidades del híbrido —acercarse a una parada sin pisar el pedal del acelerador, por ejemplo—, los valores de economía de combustible se aproximan a las cifras de la EPA. La conducción agresiva disminuye hasta más de un 30 por ciento el rendimiento en combustible de los vehículos híbridos (ese tipo de conducción repercute menos en el consumo de los coches ordinarios). Por lo general, la autonomía de los híbridos integrales es mucho mayor en el tráfico urbano, con sus arranques y paradas, que al circular por autopista.

LOS NUEVOS VEHICULOS HIBRIDOS de gasolina y eléctricos pueden consumir más de lo medido en las pruebas homologadas.

batería en función de sus necesidades de regulación de la tensión. Estos acuerdos ayudarían a estabilizar la carga de la red de suministro.

Ante la preocupación que suscita el calentamiento global, es preciso señalar que los híbridos enchufables aventajan al respecto a otros vehículos cuyas virtudes ecológicas se pregonan mucho: los coches de pilas de hidrógeno. Los vehículos enchufables sacarían más provecho de una electricidad que no se generaría con carbono: la fabricación de hidrógeno es ineficiente y cara. Cualquier economía viable basada en el hidrógeno exigiría una infraestructura que emplease energía no procedente del carbono para obtener hidrógeno mediante electrólisis del agua, transportar este gas tan difuso a largas distancias y bombearlo a alta presión en el tanque del coche, todo ello para reconvertir luego el hidrógeno en electricidad en una pila de combustible que propulse un motor eléctrico. El proceso total de electrólisis, transporte, bombeo y conversión en la pila de combustible dejaría solamente del 20 al 25 por ciento de la energía eléctrica original para mover el motor. En un híbrido enchufable, el proceso de transmisión eléctrica, carga de la batería de a bordo y descarga de la misma invierte de un 75 a un 80 por ciento de la energía original en el motor. Por lo tanto, un vehículo de este tipo recorrerá por kilowatt-hora de electricidad renovable una distancia de tres a cuatro veces mayor que otro de pila de hidrógeno.

Si se mantienen las tendencias actuales de los costes del combustible y la amenaza del cambio climático, será de esperar una amplia transición del mercado en torno al año 2020, momento en que para la mayoría de los modelos podrá elegirse una versión híbrida. Creemos, pues, que los híbridos enchufables constituirán la opción dominante: la rapidez del progreso estará sobre todo determinada por la subida de precios del petróleo y las decisiones de los gobiernos acerca del cambio climático y la seguridad energética. Cuando llegue el día en que el petróleo deje de ser la fuente principal de energía del sistema mundial de transportes, el tipo de automóvil que con mayor probabilidad se adoptará será el vehículo híbrido enchufable que combine electricidad, obtenida sin participación del carbono, con una mezcla de biomasa combustible. Si en algún momento aumentasen sustancialmente las prestaciones de las baterías, se podría ir pasando gradualmente a los vehículos íntegramente eléctricos.

Los autores

Joseph J. Romm y **Andrew A. Frank** abogan por los vehículos híbridos. Romm es doctor en física por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Frank se doctoró en la Universidad del Sur de California; hoy enseña ingeniería mecánica y aeronáutica en la Universidad de California en Davis.

Bibliografía complementaria

THE CAR AND FUEL OF THE FUTURE. Joseph Romm. Report for the National Commission on Energy Policy, 2004. Disponible en www.energyandclimate.org

DRIVING THE SOLUTION: THE PLUG-IN HYBRID VEHICLE. Lucy Sanna en *EPRI Journal*; otoño de 2005.

Episodios climáticos extremos

Asociados al incremento de gases de efecto invernadero

Cuando se analizan los efectos que el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero pueda tener, se suele pensar en las modificaciones que causarán en el clima medio en el futuro. Sin embargo, en los últimos años se presta cada vez más atención a sus posibles consecuencias en la variabilidad del clima y en los episodios meteorológicos extremos. La razón es que las alteraciones de las temperaturas máximas o mínimas, de la frecuencia e intensidad de las olas de calor o frío, de las precipitaciones torrenciales o de la duración de las sequías pueden afectar más a las actividades humanas y naturales que el simple cambio del clima medio. Este interés por los fenómenos extremos se manifiesta en los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), convocado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Los fenómenos extremos son, por definición, poco frecuentes y de escala espacial limitada. Nuestro grupo ha aplicado el modelo de clima regional PROMES-RCM a la simulación del clima del período 2070-2100 bajo el supuesto de un gran incremento de la emisión de gases de invernadero. En concreto, adoptamos la situación hipotética A2 del informe de 2001 del IPCC: una Tierra muy poblada, con regiones económicas bien diferenciadas y desiguales, donde se han desarrollado poco las técnicas alternativas de producción de energía; un mundo, pues, donde predominan los combustibles fósiles y el carbón es una fuente importante. En 2100, de acuerdo con tales supuestos, se emitiría alrededor de cuatro veces más CO_2 que en 1990. El mismo modelo de clima ha simulado previamente un período correspondiente al clima actual (1960-1990), tanto para analizar su capacidad de reproducir el clima presente, como para servir de punto de partida de la evaluación del cambio climático, mediante su comparación con las condiciones del período futuro.

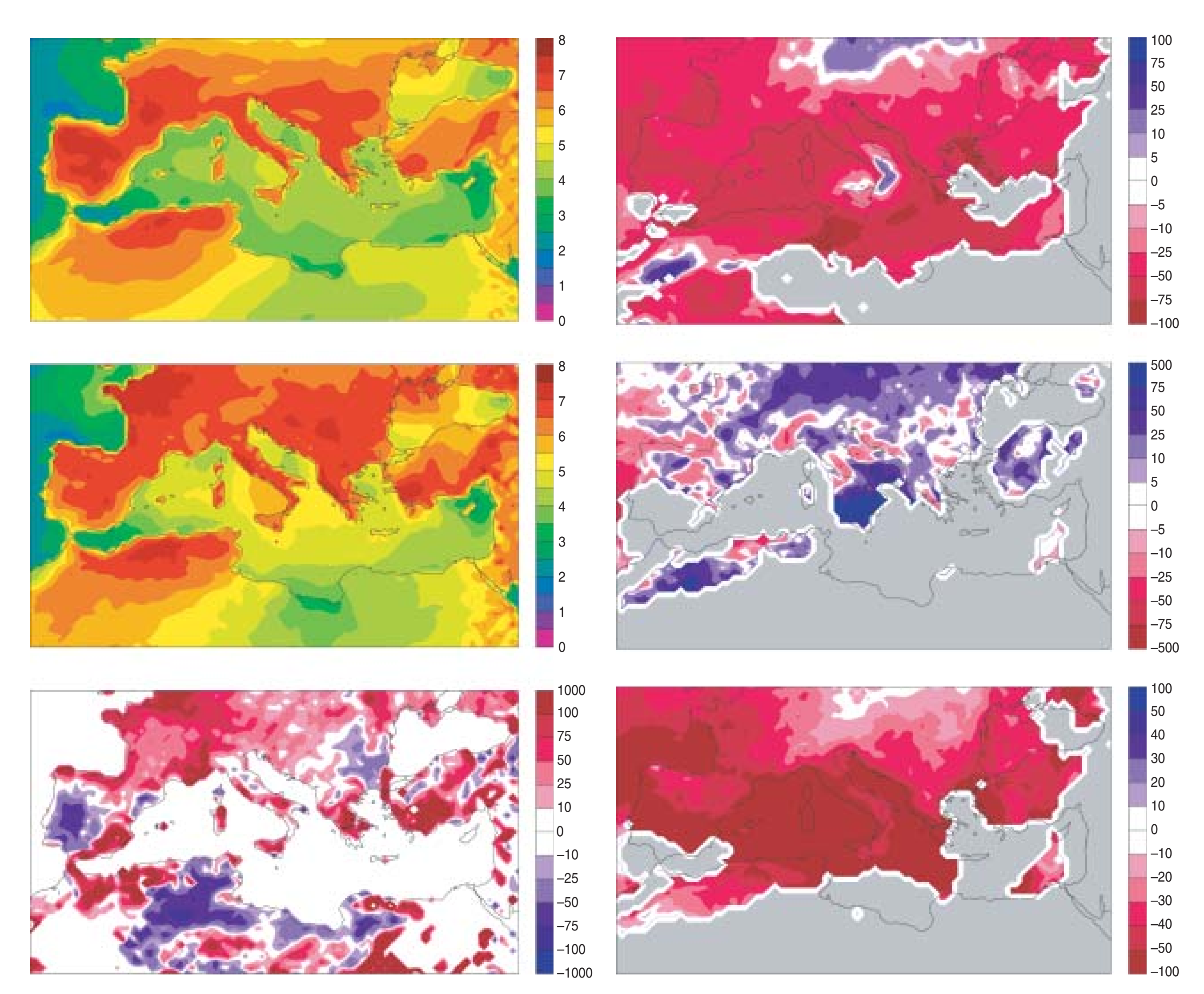
Nuestras simulaciones se han centrado en el Mediterráneo, con una resolución de 50 kilómetros. Un modelo regional del clima representa mejor los procesos extremos que los modelos globales frecuentemente usados para el estudio del cambio climático, pues el aumento de resolución permite describir mejor dichos fenómenos. La región elegida, la cuenca mediterránea, presenta varios aspectos de interés. Su variabilidad climática natural es elevada, por lo que resulta muy sensible a los posibles cambios que puedan suceder debido al aumento de gases de efecto invernadero. Y al tratarse de una zona muy poblada, el impacto potencial de dichos cambios es considerable.

Para estudiar los episodios climáticos extremos se analizan las diferencias entre el clima actual y el futuro de los valores diarios de verano de las temperaturas máximas y la precipitación. Para la temperatura máxima se consideran tres magnitudes: su media en los 2700 días de verano (2700 = 30 veranos × 90 días cada verano) de cada período ($T_{máx}$); el percentil 90 ($T^{90}_{máx}$), obtenido al ordenar de mayor a menor los 2700 valores de $T_{máx}$, y tomar el que ocupa la posición 270 de todos ellos (con lo que sólo el 10 % de los días de verano tendrán una temperatura máxima diaria mayor); y el número de olas de calor (se define "ola de calor" como un episodio en el cual la temperatura máxima diaria supera en 5 ºC la media para los 30 años de ese día, repitiéndose esta condición durante al menos 6 días consecutivos). Para la precipitación también se estudian tres magnitudes: su media para los 30 veranos (P_r); el percentil 90 (P_r^{90}), calculado como para la temperatura, pero ahora respecto a los días de lluvia (y no los 2700 días); y el número de días en los que ha llovido más del valor del percentil 90 (N^{90}). El uso de dos índices de análisis de extremos permite estudiar estos procesos tanto en su frecuencia (olas de calor, días con precipitación por encima del percentil 90) como en su intensidad (los percentiles 90).

Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran que los incrementos máximos de $T_{máx}$ corresponderían al verano (*véase la figura 1*), y los mínimos al invierno. La media de las temperaturas máximas de verano se incrementaría hasta 7 ºC en algunas zonas de la península Ibérica y norte de Africa. El incremento sería mucho más moderado en las zonas costeras. El valor de $T^{90}_{máx}$ aumentaría, de manera global, con una intensidad y estructura similares a $T_{máx}$, tanto en invierno (más moderadamente), como en verano. Esto significaría que se mantendría la proporción de sucesos extremadamente cálidos del clima actual, pero desplazados hasta 7 grados más.

Desde el punto de vista del análisis de extremos resulta interesante saber en qué zonas $T^{90}_{máx}$ aumentaría más que $T_{máx}$. La razón es que este caso podría tener consecuencias mucho peores que un simple incremento de $T_{máx}$ para las personas, los animales, la vegetación y las cosechas. Y esto sucedería en Europa Central, al norte de la región Mediterránea.

En cuanto a las olas de calor en verano, su cambio no parece estar correlacionado con el de las otras dos magnitudes. En algunas zonas donde se produciría un incremento de las olas de calor (todo el sur de Francia o el norte de Marruecos), coincidiría con un incremento considerable de $T_{máx}$ y $T^{90}_{máx}$, por lo que los veranos serían más cálidos de media, con episodios extremos de una intensidad incrementada de forma similar y con una duración que también aumentaría. No sucedería lo mismo en otros lugares (en buena parte de la península Ibérica), donde el número de olas de calor descendería, si bien crecería mucho la intensidad de los



1. Cambios en las temperaturas máximas diarias de verano entre el clima actual (1960-1990) y el de 2070-2100, de acuerdo con las condiciones de la hipótesis A2 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Arriba, cambios en la media de la temperatura máxima (en ºC); en medio, cambios en el percentil 90 de las temperaturas máximas (en ºC); abajo, cambios en la duración de las olas de calor (en %).

2. Cambios en la precipitación diaria de verano entre el clima actual (1960-1990) y el de 2070-2100, de acuerdo con las condiciones de la hipótesis A2 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Arriba, cambios en la precipitación media (en %); en medio, cambios en el percentil 90 de la precipitación diaria (en %); abajo, cambios en el número de días con precipitación por encima del percentil 90 (en %).

episodios de extremos de temperatura máxima ($T^{90}_{máx}$).

Los cambios de los episodios extremos relacionados con la precipitación serían más complejos. Este resultado es esperable, pues se trata de una magnitud mucho más irregular y variable. Para el verano se obtienen unos resultados muy interesantes (*véase la figura 2*): la precipitación descendería en casi todo el dominio, mientras que en las demás estaciones habría regiones con ascensos y con descensos. El percentil 90 de precipitación presenta un comportamiento mucho más complicado, pero predominarían los ascensos. En consecuencia, aunque en todas esas zonas llovería menos en promedio, los días que lloviese lo haría con más intensidad, apuntando entonces a un aumento de la torrencialidad. Los cambios en el número de días de precipitación intensa (N^{90}) indican un descenso general en todo el dominio para el verano, por lo que esas lluvias más intensas (P_r^{90} mayor) se concentrarían en menos días todavía y serían, por tanto, más torrenciales. Cambios en ambos índices de extremos de precipitación indicarían unos efectos potencialmente muy dañinos.

Para mejorar la fiabilidad y robustez de estos estudios del efecto de los cambios climáticos en los episodios extremos, el empleo de varios modelos que simulen los mismos períodos es muy recomendable. Así lo ha hecho el proyecto europeo PRUDENCE.

E. Sánchez, C. Gallardo,
M. A. Gaertner, A. Arribas
y M. Castro
Facultad de Ciencias
del Medio Ambiente,
Universidad de Castilla-La Mancha
(UCLM), Toledo

La *cova des Pas*

Un yacimiento prehistórico excepcional

Durante la primavera de 2005 dos espeleólogos, Pere Arnau y Josep Riera, y la arqueóloga Mónica Zubillaga descubrieron en los acantilados del barranco de Trebelúger, en Ferreries, Menorca, una cueva, la *cova des Pas*, intacta, con restos humanos que apenas asomaban en superficie. El pie y la mata de pelo que quedaban a la vista se sumaban a una estructura de madera, también visible.

Enterada la Consejería de Cultura del Consejo Insular de Menorca por el informe que hicieron los tres descubridores, se decidió encargar un proyecto de investigación a tres centros: El SERP (Seminario de Estudios e Investigaciones Prehistóricas) de la Universidad de Barcelona, el Laboratorio de Arqueología de la Universidad de las islas Baleares y la Unidad de Antropología Biológica de la Universidad Autónoma de Barcelona. Los cinco coordinadores que firmamos esta nota asumimos dicha labor y en septiembre de 2005 se inició la excavación del yacimiento bajo la dirección de seis arqueólogos, con la colaboración de expertos en paleoantropología y en restauración. Se preveía ya, por lo tanto, la posibilidad de que aparecieran hallazgos susceptibles de ser tratados con especial atención con vistas a su conservación.

Las expectativas se vieron pronto superadas por la excepcionalidad de los restos que la pequeña cueva sepulcral de apenas 20 m^2 nos iba ofreciendo. Ya en los primeros individuos localizados pudieron identificarse restos de cabellos, entre los cuales destacaba una larga trenza aún pegada al cráneo de un adulto masculino, adornada además con diversas anillas de estaño puro, objetos de lujo en la prehistoria mediterránea. Pero la sorpresa fue en aumento cuando también se identificaron restos de masa pulmonar adheridos a las costillas, masa cerebral en el interior de algunos cráneos, heces fecales y tejidos musculares pegados a diversos huesos. Si a ello añadimos que también se conservaban cuerdas y sudarios de piel de animal que sirvieron para adecuar los cadáveres para su entierro en la cueva, envolviéndolos y atándolos, tendremos un corpus de información excepcional que nos ayudará a entender mejor la sociedad menorquina de hace unos tres mil años.

Otros elementos arqueológicos han servido, de momento, para situar cronológicamente el hallazgo, a la espera de las fechas absolutas, en curso de determinación. Nos hemos valido de los pequeños tubos de madera, hueso y piel en el interior de los cuales se guardan cabellos humanos, ya encontrados en la *cova des Càrritx*, y de algunos elementos metálicos, de bronce, como agujas, brazaletes y una punta de lanza. Todo apunta hacia la fase naviforme, caracterizada por la construcción de las navetas, grandes sepulcros colectivos en forma de nave invertida, y situada entre 1100 y 800 a.C., época en la que las cuevas sepulcrales eran de uso común en la isla.

La conservación de elementos vegetales es también excepcional. Lo más llamativo son varias parihuelas sobre las que se han encontrado depositados algunos esqueletos humanos, aún atados a ellas con cuerdas para su mejor traslado hasta la cueva. Junto a ellas hay numerosos fragmentos de ramitas y de tallos que nos hacen pensar en preparaciones sobre las cuales se colocaría a algunos de los individuos.

La información que nos van a proporcionar los más de setenta individuos enterrados en la *cova des Pas* será de gran interés para la comunidad científica internacional. En efecto, además de poder precisar por primera vez los sistemas de enterramiento (en posición fetal, envueltos en un sudario de piel animal y atados con cuerdas), los elementos blandos conservados proporcionarán muestras de ADN que nos permitirán la caracterización genética de la población, el parentesco dentro de ella y el grado de conexión con las de otras áreas insulares y continentales.

El trabajo de laboratorio, apenas iniciado, cuenta con especialistas en las más diversas materias que puedan aportar luz acerca de los hallazgos. La geoarqueología está trabajando para esclarecer el motivo último de la conservación de la materia orgánica; los anatomopatólogos del Hospital Clínico de Barcelona han empezado a identificar y a analizar los restos pulmonares, cerebrales y fecales, que deben proporcionarnos datos inéditos de la dieta y de las patologías; los paleobotánicos han comenzado el análisis de maderas, pólenes y fitolitos para caracterizar la naturaleza de las plantas introducidas por mano humana en el lugar de enterramiento; los paleoantropólogos apenas están entreviendo la magnitud de la labor que en los próximos años van a asumir para



1. Masa pulmonar adherida a las costillas del individuo 1.

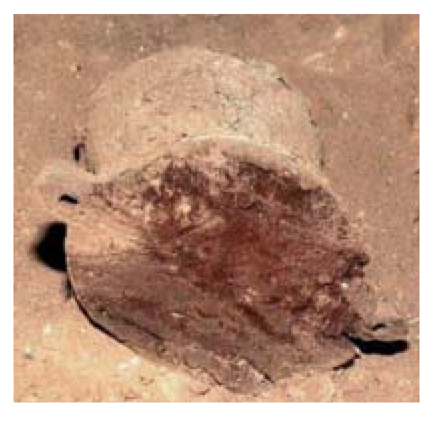


2. Cuerdas trenzadas que se utilizaron para atar a los difuntos.

caracterizar física y genéticamente la población exhumada; y los arqueólogos van a explotar el alud de datos que la avanzada metodología empleada les proporcionará para entender mejor la vida y la muerte de una población menorquina de hace tres mil años.

Es un trabajo a medio plazo que está contando con el apoyo financiero del Consejo Insular de Menorca y de la fundación *Caixa de Catalunya* y que en los próximos años pasará de ser una novedad apenas entrevista en los medios de comunicación a un sólido caudal de información científica que se traducirá en libros y exposiciones de cara al conocimiento general del público.

Manuel Calvo, Josep M. Fullola, Víctor Guerrero, Assumpció Malgosa y M. Àngels Petit,
coordinadores del proyecto



3. Tubo de cuero y madera que formaba parte del ajuar funerario.

4. Enterramiento infantil sobre parihuela de madera.

Nanotubos de carbono

Espectroscopía de fluorescencia

Sumio Iijima descubrió los nanotubos de carbono en 1991 mientras estudiaba la evaporación por descargas de chispas eléctricas entre electrodos, uno de los métodos de síntesis de fullerenos. Desde entonces, han excitado la imaginación de científicos y aficionados.

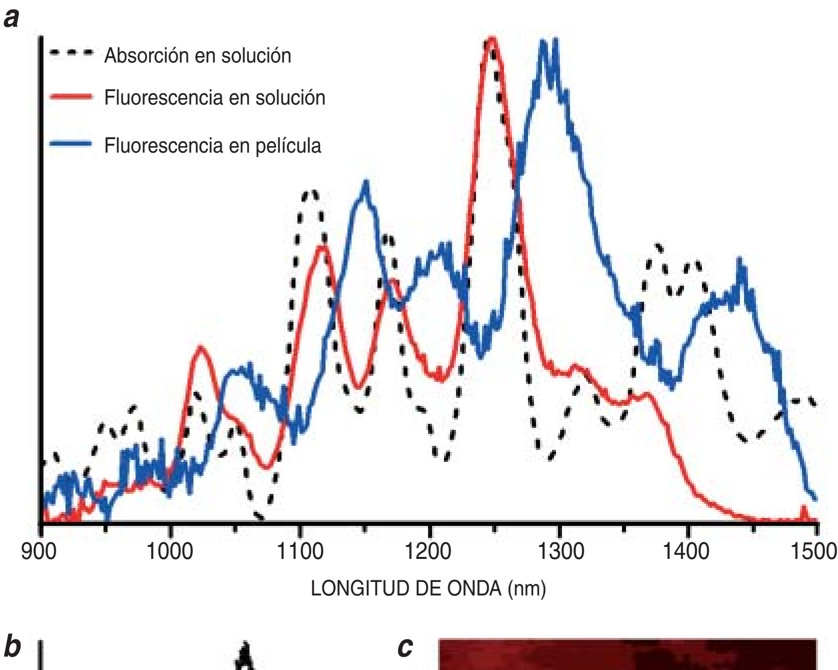
Los nanotubos consisten en grafenos (láminas bidimensionales de átomos de carbono que se enlazan entre sí) enrollados en forma de cilindro, con un diámetro del orden del tamaño de una molécula pequeña (alrededor de un nanómetro) y una longitud que cae entre el grosor de un cabello humano (unos diez micrometros) y varios centímetros.

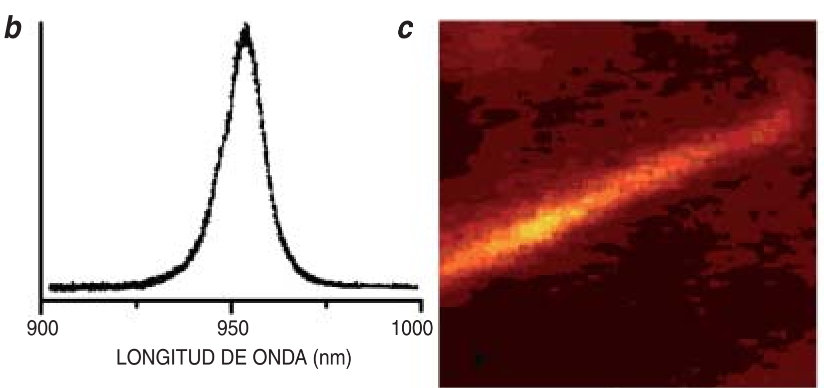
Los nanotubos de carbono que constan de un solo cilindro se denominan nanotubos de pared única. Estas singulares moléculas pueden ser metálicas o semiconductoras; depende de su estructura reticular. Exhiben, además, muchas otras propiedades interesantes. Por ejemplo, los metálicos conducen la electricidad varios órdenes de magnitud mejor que los hilos de cobre, pese a que son cien veces más angostos que las dimensiones litográficas de los circuitos integrados. Cambiando el tamaño de los nanotubos semiconductores, se puede variar (“sintonizar”) el salto de energía entre los estados en que sus electrones se hallan enlazados a átomos y los estados en que tienen la libertad de movimiento que poseerían en un conductor.

Las longitudes de onda que el nanotubo puede emitir conforme a la amplitud de su salto abarcan un intervalo grande, desde el visible hasta el infrarrojo; esta variedad propicia aplicaciones en la electrónica nanométrica, la optoelectrónica, la biotécnica y la óptica cuántica.

De ordinario, la síntesis de nanotubos de pared única genera cordones muy apretados, donde se mezclan las variantes metálica y semiconductora. Las propiedades electrónicas de estos cordones difieren de las que presentan los nanotubos sueltos: el agrupamiento ensancha los niveles de energía y disminuye la energía total; además, provoca la transferencia de energía entre los nanotubos superconductores y los metálicos, como en un cortocircuito eléctrico. Una consecuencia es la supresión de la fluorescencia de los nanotubos de pared única superconductores; ésta fue la razón de que, durante más de diez años tras su descubrimiento, no fuese factible el estudio de los nanotubos por medio de la espectroscopía óptica.

Aislar nanotubos superconductores de una sola pared en micelas (partículas cargadas formadas por moléculas de polímero o iones en una solución elecrolítica), método ideado por Richard Smalley y sus colaboradores de la Universidad Rice, elimina el fuerte acoplamiento electrónico entre los nanotubos de un haz. El espectro de absorción de los nanotubos aislados presenta ras-





Absorción de conjunto en solución (*a, línea de puntos negra*), fluorescencia de conjunto en solución (*línea roja*) y fluorescencia de conjunto de una película densa (*línea azul*). Cada pico del espectro corresponde a una estructura de nanotubo diferente. Espectro de fluorescencia (*b*) e imagen de fluorescencia (*c*) de un nanotubo individual.

gos que corresponden a estructuras de nanotubo de pared única sueltas (*véase* a *en la figura*). Además, la falta de interacciones entre los tubos posibilita la observación de la fluorescencia de esas estructuras. La energía de los rasgos espectrales de fluorescencia particulares puede atribuirse a estructuras de nanotubo específicas porque la energía de fluorescencia tiene un desplazamiento Stokes medio de 40 cm^{-1}, es decir, hay una diferencia perceptible entre las frecuencias en que el sistema emite y absorbe. No obstante, las mediciones de la fluorescencia de conjunto han de limitarse todavía a promediar sobre muchas estructuras de nanotubo; mucha información fundamental queda así oculta, por ejemplo la anchura y el tipo espectrales.

Envolver nanotubos aislados alrededor de un sustrato de vidrio a concentraciones muy bajas permitió a Achim Hartschuh, Lukas Novotny y los dos autores de este artículo, todos de la Universidad de Rochester, medir la fluorescencia de nanotubos sueltos, es decir, la luz que emiten tras haber recibido una radiación. La espectroscopía de fluorescencia de moléculas sueltas muestra que el perfil espectral consiste en una función monovaluada, con las líneas ensanchadas de manera lorentziana (un tipo de curva acampanada), como cabe esperar de una sola transición molecular. En cambio, sí fue inesperado que nanotubos de pared única con la misma estructura no tuviesen la misma fluorescencia. Estas diferencias en la energía y el ancho de línea de la fluorescencia se deben a perturbaciones locales de los estados electrónicos de los nanotubos de pared única; demuestra su gran sensibilidad al entorno inmediato.

La fluorescencia de la mayoría de los materiales —de los puntos cuánticos semiconductores coloidales, de las proteínas o de moléculas de los tintes orgánicos— exhibe, cuando se toma una sola de sus moléculas, intermitencias o “parpadeos” en su intensidad. Resulta bastante sorprendente que la fluorescencia de los nanotubos individuales no muestre esos parpadeos a temperatura ambiente. Esta propiedad confiere a los nanotubos de carbono la singular capacidad de servir de fuente de fotones infrarrojos emitidos por moléculas aisladas; abre el paso a posibilidades apasionantes en la óptica cuántica y en la biotécnica.

La estabilidad de las suspensiones micelares de nanotubos de pared única es muy sensible a las condiciones ambientales, por ejemplo a la temperatura y a la concentración de los surfactantes utilizados para formar el micelio. Resultaría muy ventajoso contar con muestras sólidas de nanotubos de pared única con fluorescencia, ya que las suspensiones acuosas limitan las mediciones de la fluorescencia a nanotubos de pared única con un diámetro menor de 1,2 nanómetros, a causa de la absorción de los infrarrojos por el agua (recuérdese que la longitud de onda de la luz emitida depende del diámetro del nanotubo). No sirve de nada secar la suspensión acuosa, porque entonces los nanotubos se reagrupan, se pierde con ello fluorescencia y los elementos distintivos del espectro se ensanchan. Para superar estas limitaciones, se podrían encajar los nanotubos de pared única en micelas entrecruzadas de manera parecida a como se forman los polímeros duros. Según las mediciones de la fluorescencia de películas sólidas densas de nanotubos de pared única tras el entrecruzado, los nanotubos permanecen en un entorno homogéneo de hidratos de carbono, tal y como ocurre en las suspensiones acuosas (*véase* a *en la figura*).

HERMENEGILDO N. PEDROSA
y TODD D. KRAUSS
Dpto. de Química
Universidad de Rochester

Josep-Maria Gili

Oso marino de El Cabo

1. Cabo Cruz en uno de los escasos momentos en que no está ocupado por ejemplares de oso marino de El Cabo (*Arctocephalus pusillus*).

La zona de Cabo Cruz, en la costa norte de Namibia, ofrece una imagen desoladora: un desierto a orillas del mar. Pero en esas playas se encuentra una de las mayores colonias de osos marinos de las costas atlánticas. Se trata de colonias de *Arctocephalus pusillus*, el oso marino de El Cabo. No es una verdadera foca. Está emparentado con el león marino. Su abundancia se corresponde con la riqueza de alimento que ofrecen las aguas costeras del Atlántico sur; allí captura grandes cantidades de sardina, anchoa, caballa y merluza.

Tamaña voracidad ha constituido también uno de los pretextos para su caza y explotación, pues se le acusa, injustamente, de esquilmar los bancos de pesca en la zona. Aunque la colonia de Cabo Cruz es una reserva, se permite la caza de más de 60.000 cachorros y 7000 machos adultos. Desde 1900 se han capturado varios millones de osos marinos para la explotación de la piel y la carne; se aprovechan los huesos para harinas y los testículos para productos afrodisíacos.

Si bien la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) la incluye entre las protegidas, su captura está permitida en Namibia, donde hace poco morían anualmente más de 200.000 ejemplares por malnutrición, debido a la sobrepesca de los bancos de los que se alimentan. Los adultos, sobre todo las hembras cuando dejan a sus crías a la semana del parto, son atacados por tiburones y orcas. Los cachorros sufren el ataque de hienas y chacales. Las hembras buscan alimento durante 3 o 4 días; después regresan a la costa para alimentar a sus crías durante 2 o 3 días. Este proceso dura alrededor de 10 meses.

JOSEP-MARIA GILI

2. Llegada masiva de adultos a las playas de Cabo Cruz. Arriban primero los machos, entre octubre y noviembre. Durante varios días luchan por dominar un territorio donde mantendrán un harén de 7 a 25 hembras.





3. Las hembras pueden superar los 100 kg de peso y medir unos l,5 metros de longitud. Los machos alcanzan hasta los 350 kg y más de 2 metros de largo. Las crías tienen la piel negra hasta que mudan tras amamantarse durante 8-10 meses; nacen con un peso de 5 kg y un escaso medio metro de longitud. Las hembras alcanzan la madurez sexual a los 4 años; los machos a los 5. La capacidad de reproducción de las colonias, sin embargo, llega a los 10-13 años. Las hembras pueden vivir 21 años; los machos, 19.

4. En el momento álgido de la colonia apenas se encuentra un espacio libre en la arena. Se han censado unos dos millones de ejemplares. Más de dos tercios de la población se sitúan en la costa norte de Namibia.

¿Por qué son tan inteligentes alg

El insólito comportamiento de los orangutanes de un pantano de Sumatra sugiere que



PERRY VAN DUIJNHOVEN DE *AMONG ORANGUTANS: RED APES AND THE RISE OF HUMAN CULTURE*, POR CAREL VAN SCHAIK. THE BELKNAP PRESS OF HARVARD UNIVERSITY PRESS, ©2004 BY THE PRESIDENT

unos animales?

el aprendizaje potencia la capacidad mental

Carel van Schaik



1. ORANGUTANES, madre e hijo, en Sumatra.

Aunque somos los humanos quienes escribimos los manuales y no es de extrañar, por tanto, que se introduzcan opiniones sesgadas, pocos dudan que seamos los seres más inteligentes del planeta. Muchos animales poseen capacidades cognitivas especiales que les permiten desenvolverse en su hábitat, pero no suelen resolver problemas nuevos. Aunque algunos lo consiguen y, por ello, los consideramos inteligentes, ninguno es tan perspicaz como nosotros.

¿Qué propició el desarrollo de esta capacidad mental distintiva en los humanos o, más precisamente, en nuestros antepasados homínidos? Una manera de abordar la respuesta a esta cuestión consiste en examinar los factores que pudieron haber modelado a otros animales que muestran una inteligencia elevada y ver si las mismas fuerzas pudieron haber operado en nuestros antepasados. Elefantes, delfines, loros, cuervos y otras aves y mamíferos no humanos, por ejemplo, resuelven problemas mucho mejor que otros animales. Pero son nuestros parientes próximos, los grandes simios, los que pueden revelar información más esclarecedora.

Se han propuesto muchas explicaciones para la evolución de la inteligencia en los primates, la estirpe a la que pertenecen humanos y simios (junto con monos, lémures y loris). Nuestra investigación sobre los orangutanes, en la que mi grupo lleva trece años empeñado, nos ha permitido elaborar una nueva explicación de la cuestión.

Teorías incompletas

Una de las hipótesis más influyentes sobre la inteligencia de los primates atribuye a la complejidad de la vida social los estímulos para el desarrollo de las capacidades cognitivas. Se la conoce por hipótesis de la "inteligencia maquiavélica". A tenor de la misma, el éxito en la vida social depende del cultivo de las relaciones más provechosas y de la interpretación rápida de la situación social; por ejemplo, a la hora de decidir si hay que acudir en ayuda de un aliado que es atacado por otro animal. Las demandas de la sociedad estimularían la inteligencia porque los individuos más inteligentes serían los que tendrían mayor éxito al tomar decisiones autoprotectoras y, con ello, sobrevivirían para transmitir sus genes a la generación siguiente. Sin embargo, los rasgos "maquiavélicos" no resultan quizás igualmente beneficiosos para otras estirpes, ni para todos los primates. Por sí sola, la hipótesis resulta, pues, insuficiente.

Otras fuerzas pueden haber promovido el desarrollo de la inteligencia. Pensemos en la dificultad de conseguir alimento. En este contexto, la capacidad de idear un método de extracción de comida oculta o la de recordar la localización continuamente cambiante de alimentos básicos constituirían una ventaja. Tal destreza se premiaría con la transmisión de genes a la generación siguiente.

Mi interpretación, que no es incompatible con estos factores, pone el acento en el aprendizaje social. En los humanos, la inteligencia se desarrolla a lo largo de la vida. Un niño aprende, ante todo, de la información que

le ofrecen unos adultos pacientes. Sin unos vigorosos estímulos sociales —es decir, culturales—, hasta un niño prodigio en potencia terminará siendo basto y romo.

Ese mecanismo de aprendizaje social opera también en los grandes simios. En mi opinión, los animales inteligentes son, en general, los que se abren a la cultura; esto es, aprenden unos de otros soluciones innovadoras a problemas ecológicos o sociales. Mi tesis, en breve, es que la cultura promueve la inteligencia.

Llegué a esta conclusión por una vía indirecta. En los pantanos de la costa occidental de la isla indonesa de Sumatra, donde mis compañeros y yo estudiábamos a los orangutanes. El orangután es el único gran simio de Asia; se halla confinado en las islas de Borneo y Sumatra, y es de hábitos preferentemente solitarios. Comparado con su pariente más cercano, el chimpancé africano, el simio rojo es más sereno que hiperactivo, más reservado que sociable. Pese a tales peculiaridades, descubrimos las condiciones que favorecen en los orangutanes el florecimiento de la cultura.

Técnica en el pantano

Nos decidimos por el pantano porque allí se refugiaban muchos individuos. A diferencia de los bosques no inundados de la isla, el hábitat húmedo de los pantanos proporciona alimento abundante para los simios a lo largo del año, con lo que puede sostener una población numerosa. Trabajamos en Suaq Balimbing, en el pantano de Kluet. Quizá fuera el paraíso para los orangutanes, pero el fango pegajoso, la profusión de mosquitos y un calor y humedad agobiantes lo convertían en un infierno para los investigadores.

Las sorpresas empezaron desde los primeros hallazgos: los orangutanes de Suaq fabricaban y manejaban utensilios muy diversos. Aunque los simios rojos cautivos son ávidos usuarios de útiles, esta capacidad nunca se había observado entre los orangutanes salvajes. Los animales de Suaq aplican sus instrumentos a dos objetivos fundamentales. En primer lugar, se dedican a la búsqueda de hormigas, termes y, en especial, miel (sobre todo la de abejas inermes), más de lo que lo hacen sus parientes orangutanes en otras áreas. Observan los troncos de árboles en busca del tráfico aéreo que entra y sale de pequeños agujeros. Una vez localizados, los agujeros se convierten en el foco de inspección, primero visual y luego manual, mediante un dedo que utilizan para hurgar y luego recolectar. Puesto que el dedo suele resultar demasiado corto, el orangután recurre a un palito; después de insertarlo cuidadosamente, lo mueve con delicadeza hacia atrás y hacia delante; lo retira luego, lo lame y lo vuelve a introducir. La mayor parte de esta "operación" se realiza con el palito firmemente apretado entre los dientes; sólo los utensilios de mayor tamaño, que se usan sobre todo para arrancar a golpes fragmentos de termiteros, se sujetan con las manos.

El segundo contexto en el que los simios de Suaq emplean utensilios guarda relación con el fruto de *Neesia*. Este árbol produce cápsulas leñosas, de cinco ángulos, de hasta 25 centímetros de longitud y 10 centímetros de ancho. Las cápsulas están llenas de semillas pardas del tamaño de habas. Son semillas muy nutritivas con un contenido en grasas del 50 por ciento, un deleite raro y muy buscado en ese hábitat. El árbol protege sus semillas con una cáscara muy dura. Sin embargo, cuando las semillas están maduras, la vaina empieza a rasgarse; las rendijas se agrandan de forma gradual, dejando ver las hileras de semillas, que muestran unas

2. EL PANTANO DE KLUET proporciona un hábitat de insólita exuberancia para los orangutanes. En un entorno tan rico, los simios rompen su habitual modo de vida en solitario y son extraordinariamente sociables.

Resumen/Cultura orangután

- Se ha descubierto el uso generalizado de herramientas en los orangutanes de un pantano de Sumatra. Hasta ahora no se habían observado orangutanes que, en su medio natural, recurrieran de forma sistemática al uso de herramientas.
- Este descubrimiento sugiere la resolución de un viejo enigma: ¿Por qué son tan inteligentes algunos animales?
- Parece que la clave reside en la cultura. Los primatólogos definen la cultura como la capacidad de aprender, mediante observación, destrezas desarrolladas por otros. La cultura desencadena logros sin límite y puede hacer que una especie alcance niveles crecientes de inteligencia.



3. LA MAYORIA DE LOS ORANGUTANES pasan la vida sin fabricar ni utilizar herramientas. Los simios rojos de Suaq constituyen una excepción: se sirven de artilugios. Uno de los más comunes es un palito (*arriba*), que preparan para recolectar hormigas, termes y, sobre todo, miel. Sin él (*izquierda*), suele fracasar la extracción de la miel del agujero del árbol; a mordiscos, por ejemplo. Los simios de Suaq, en cambio, introducen el palito en el agujero y, mientras lo sostienen con la boca (*flecha a la derecha*), lo mueven delicadamente adelante y atrás. Después lo retiran y lamen la miel (*más a la derecha*).

hermosas fijaciones rojas (arilos) que contienen un 80 por ciento de materia grasa. Para desanimar más todavía a los frugívoros, la vaina está llena de una masa de agujas afiladas como navajas. Los orangutanes de Suaq arrancan la corteza de ramitas cortas y rectas, que después sostienen en la boca e insertan en las rendijas. Moviendo el utensilio arriba y abajo de la hendidura, el animal desprende las semillas de sus pedúnculos. Después, hace que las semillas caigan directamente dentro de su boca. Al final de la estación, los orangutanes comen sólo los arilos rojos; emplean la misma técnica para alcanzarlos sin herirse.

Ambos métodos de obtención de comida mediante palitos se hallan muy extendidos en Suaq. En general, la "pesca" en agujeros de árboles se produce de forma ocasional; dura sólo unos pocos minutos. Cuando los frutos de *Neesia* maduran, los simios dedican la mayor parte de sus horas de vigilia a la obtención de semillas o arilos, con lo que empiezan a engordar y a ganar en lozanía.

Por qué el uso de utensilios es cultural

¿A qué se debe esta curiosa concentración local del recurso a los instrumentos? En otras partes, los orangutanes salvajes muestran, en efecto, escasa propensión para ello. No es que los orangutanes de Suaq sean intrínsecamente más listos. En cautividad, la mayoría de los miembros de esta especie aprenden a utilizar herramientas, por lo que cabe inferir que poseen la capacidad cerebral básica para hacerlo.

La respuesta podría hallarse, pues, en el ambiente. Los orangutanes estudiados hasta entonces medraban, sobre todo, en bosques secos. El pantano proporciona un hábitat exuberante. Hay aquí más insectos que construyen sus nidos en agujeros de árboles que en bosques que no son de inundación. *Neesia* crece sólo en lugares húmedos, por lo general cerca de cursos de agua. Sin embargo, por tentadora que parezca la explicación ambiental, no da cuenta de por qué los orangutanes pertenecientes a diversas poblaciones, distintas de la de Suaq, ignoran recursos alimentarios tan nutritivos. Tampoco explica por qué otras poblaciones consumidoras de semillas las recolectan sin valerse de instrumentos; lo que acarrea que coman muchas menos que los orangutanes de Suaq. Dígase lo mismo de los utensilios que aplican a las cavidades de los árboles. De forma ocasional, cuando las colinas cercanas (con bosque de tierras secas) presentan fructificación masiva, los orangutanes de Suaq se desplazan allí para satisfacer su apetito; mientras recogen frutos, utilizan los utensilios para explotar el contenido de los huecos de los árboles. El hábitat colinar abunda en toda el área de distribución de los orangutanes. Por tanto, si se usan utensilios en las laderas que rodean Suaq, ¿por qué no en todas partes?

Se sopesó otra posibilidad. Al constituir Suaq una zona densamente poblada, la competencia por los víveres es allí mayor. En consecuencia, muchos individuos se quedarían sin comida a menos que accedieran a los recursos más ocultos. Es decir, para comer *necesitaban* utensilios. La objeción más sólida contra esta hipótesis es que los alimentos dulces o grasos que los útiles hacen accesibles ocupan posiciones elevadas en la lista de preferencias de los orangutanes; por tanto, estos animales deberían buscarlos en todas partes. En cualquier parte, los simios rojos se hallan siempre expuestos a recibir varias picaduras de abejas melíferas con el fin de alcanzar su miel. Tampoco la hipótesis de la necesidad parecía, pues, determinante.

De muy distinta naturaleza era la posibilidad siguiente: los comportamientos descritos corresponden a

JEN CHRISTIANSEN (*mapa*); PERRY VAN DUIJNHOVEN DE *AMONG ORANGUTANS: RED APES AND THE RISE OF HUMAN CULTURE*, POR CAREL VAN SCHAIK. THE BELKNAP PRESS OF HARVARD UNIVERSITY PRESS, ©2004 BY THE PRESIDENT AND FELLOWS OF HARVARD COLLEGE (*fotografías de arriba y páginas anteriores*)



4. EL FRUTO DEL ARBOL DE *NEESIA* (*arriba, izquierda*) ha inspirado la invención de otra herramienta del repertorio de los orangutanes de Suaq. Las semillas, muy nutritivas, están rodeadas por agujas afiladas como navajas que mantienen alejados a los mamíferos frugívoros. Para evitar clavarse las espículas, los simios de Suaq pelan la corteza de ramitas cortas y rectas, que después sostienen con la boca e insieren en las hendiduras del fruto maduro (*derecha*). Removiendo la herramienta arriba y abajo, en el seno de la hendidura, van retirando las semillas sin herirse. La fotografía del centro muestra un pequeño fruto del que todavía sobresale la ramita.

técnicas innovadoras que inventaron una pareja de orangutanes inteligentes; las habilidades en cuestión se habrían extendido y persistido en la población porque otros individuos las aprendieron mediante la observación de los pioneros. En otras palabras: el uso de utensilios sería cultural. El estudio de la cultura en la naturaleza ha de superar un obstáculo: con la excepción de introducciones experimentales, nunca podemos demostrar que el animal que estamos observando inventa alguna estrategia novedosa, que no está aplicando un hábito cabalmente recordado pese a su escasa práctica. Tampoco podemos comprobar que un individuo aprendió una nueva habilidad de otro miembro del grupo, en lugar de imaginarla por su cuenta. Aunque podemos demostrar que en el laboratorio los orangutanes son capaces de observar y aprender socialmente, dichos estudios no nos dicen nada acerca de la cultura en la naturaleza: ni en qué consiste ni cuánta hay. Los trabajados de campo se vieron así obligados a desarrollar un sistema de criterios para definir si un determinado comportamiento poseía una base cultural.

En primer lugar, el comportamiento debe variar geográficamente; ello demuestra que se inventó en algún lugar. Además, debe ser común allí donde se encuentre, prueba de que se extendió y persistió en una población. El uso de herramientas en Suaq cumple sobradamente estas dos condiciones. El segundo paso consiste en eliminar explicaciones más sencillas que produzcan el mismo patrón espacial pero sin implicar el aprendizaje social. Ya hemos excluido una explicación ecológica, en la que los individuos expuestos a un hábitat particular convergen de forma independiente en la misma destreza. Podemos eliminar también la genética, pues la mayoría de los orangutanes en cautividad aprenden a usar utensilios.

El tercer test es el más apremiante: hemos de poder descubrir distribuciones geográficas de la conducta en estudio que se expliquen en razón de la cultura y no hallen obvia justificación en otros factores. Un patrón clave sería la presencia de un comportamiento en determinado lugar y su ausencia allende las barreras naturales que impidan su propagación.

En el caso de los usuarios de herramientas de Suaq, la distribución geográfica de *Neesia* ofreció pistas decisivas. Los árboles de *Neesia* (y los orangutanes) se encuentran a ambas orillas del río Alas, de ancho cauce. Sin embargo, en el pantano de Singkil, al sur de Suaq y en la misma ribera del río Alas, el suelo estaba lleno de útiles, mientras que en el pantano de Batu-Batu, al otro lado del río, no hallamos ninguna herramienta en las numerosas visitas que realizamos en distintos años. En Batu-Batu, aparecieron desgajados muchos frutos, señal de que los orangutanes de allí comían las semillas de *Neesia* siguiendo el mismo proceder que los orangutanes de Gunung Palung, en la distante Borneo; en cambio diferían por entero de la estrategia adoptada por sus primos del otro lado del río, en Singkil.

Batu-Batu es una zona pantanosa de limitada extensión, apenas fores-

tada. Sólo da para sostener una cifra restringida de orangutanes. No sabemos si el uso de utensilios no llegó a inventarse o si no pudo mantenerse en tan reducida población, pero sí conocemos que los que migraron a través del río no lo llevaron nunca allí porque, en ese tramo, el Alas es tan ancho que resulta infranqueable para un orangután. Allí donde se puede vadear, más arriba, *Neesia* crece de forma ocasional, pero los orangutanes de aquella región lo ignoran, desconocedores al parecer de sus ricos dones.

Por consiguiente, la interpretación cultural ofrece la explicación menos forzada de la yuxtaposición inesperada de hábiles usuarios de utensilios y de ramoneadores de fuerza bruta, que viven prácticamente unos al lado de los otros, así como la presencia de simios ignorantes río arriba.

Interacciones tolerantes

¿Por qué se dan estos usos refinados de herramientas en Suaq y no en otros lugares? Para abordar la cuestión, empezamos por comparar entre lo observado en todas las localidades donde se han estudiado orangutanes. Y descubrimos que, aun cuando se excluía el recurso a los instrumentos, Suaq presentaba el mayor número de cuantas innovaciones se habían extendido por toda la población.

Como hipótesis de partida, aventuramos que aquellas poblaciones en las que los individuos gozaban de mayor probabilidad de observar a otros en acción mostrarían una diversidad de habilidades aprendidas mayor que la exhibida por las poblaciones que ofrecían menos oportunidades para el aprendizaje. En efecto, los sitios donde los individuos pasan más tiempo con otros muestran repertorios más amplios de innovaciones aprendidas; una relación, dicho sea de pasada, válida también para los chimpancés. Esta conexión era muy intensa en el comportamiento asociado con la comida, fenómeno lógico si pensamos que adquirir habilidades alimentarias de otro individuo precisa de una observación más inmediata que captar una señal refinada de comunicación. En otras palabras, los animales expuestos a un menor número de individuos educados poseen un repertorio más reducido de variantes culturales.

Al analizar los contrastes entre localidades, nos percatamos de otra peculiaridad. En todas partes, los orangutanes juveniles pasan alrededor de 20.000 horas diurnas en estrecho contacto con su madre; se comportan como aprendices entusiastas. Sin embargo, sólo en Suaq los adultos pasan juntos un tiempo considerable mientras buscan comida. A diferencia del resto de poblaciones de orangutanes estudiadas, comen a menudo del mismo "plato", en general ramas repletas de termes, y comparten comida (la carne de un loris perezoso, por ejemplo). Esta proximidad y tolerancia heterodoxas posibilitaban que los adultos menos diestros se acercaran para observar los métodos de alimentación; lo hacían con la curiosidad de un niño.

La adquisición de las habilidades más exigentes desde el punto de vista cognitivo, como el uso de herramientas evidenciado sólo en Suaq, requiere pasar tiempo cerca de individuos expertos, amén de varias tandas de observación y práctica. Aun cuando las crías aprenden sus habilidades de la madre, una población perpetuará determinadas innovaciones sólo

SUMATRA
Kluet: Uso actual de herramientas
Batu-Batu: no se han encontrado herramientas
Singkil: uso actual de herramientas
Río Alas



5. INCAPACES DE VADEAR EL RIO ALAS, los orangutanes no podrían propagar las herramientas inventadas. Los árboles del género *Neesia* y los orangutanes se encuentran a ambos lados del río (*fotografía*). Sin embargo, en el pantano de Singkil (*mapa*) los utensilios abundan en el suelo del bosque, mientras que en el pantano de Batu-Batu, al otro lado del río, los orangutanes residentes emplean una técnica más sencilla para extraer las semillas de *Neesia*, que no requiere artilugios. La extensión del uso de herramientas a Batu-Batu por orangutanes migradores no es posible: el Alas es demasiado ancho para que un simio lo cruce.

FUENTE DEL MAPA: PERRY VAN DUIJNHOVEN; ADAPTADO POR JEN CHRISTIANSEN; PERRY VAN DUIJNHOVEN (*fotografía*)

si cuenta con formas de interacción tolerante distintas de la maternal. Si la progenitora no es particularmente habilidosa, habrá otros expertos cerca; así, un juvenil seguirá siendo capaz de aprender las técnicas imaginativas que, en apariencia, no se dan de forma automática. Por tanto, cuanto más entretejida se encuentre una red social, más probable es que el grupo conserve la invención conseguida, de manera que, al final, las poblaciones tolerantes mantendrán un mayor número de comportamientos de ese tipo.

Nuestros trabajos de campo muestran que la mayor parte del aprendizaje en el medio natural, aparte del condicionamiento simple, podría contar con un componente social, al menos entre los primates.

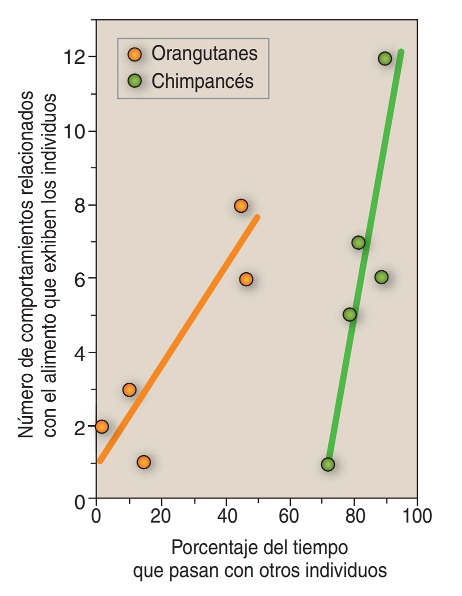
Pese a ello, la mayoría de los experimentos de laboratorio diseñados para investigar el proceso de aprendizaje de los animales se centran en la capacidad del sujeto para el aprendizaje individual. De hecho, si el test realizado en el laboratorio se aplicara en condiciones naturales, donde miles de estímulos compiten por la atención del sujeto, éste quizá nunca reparase en la existencia de un problema por resolver. En la naturaleza, las acciones de los miembros expertos de la comunidad captan la atención del novato.

Raíces culturales de la inteligencia

De nuestro trabajo con los orangutanes se desprende que la cultura —el aprendizaje social de determinadas destrezas— no sólo promueve la inteligencia, sino que favorece además el desarrollo de una inteligencia creciente en el seno de una población. Las diferentes especies varían enormemente en punto a los mecanismos que les permiten aprender de los demás. Los experimentos formales confirman lo observado en la naturaleza: los grandes simios aprenden mediante la observación de lo que otros hacen. Si un orangután en su medio o un gran simio africano muestran un comportamiento complejo desde el punto de vista cognitivo, es prueba de que ha adquirido la destreza a través de una mezcla de aprendizaje observacional y de práctica individual; recuerda en ello al niño que va amasando destrezas.

Cuando un orangután de Suaq ha adquirido más trucos que sus primos menos afortunados de otras zonas, lo ha conseguido porque dispuso de un espectro de oportunidades para el aprendizaje social en el transcurso de su vida. En resumen, el aprendizaje social puede hacer que el rendimiento intelectual de un animal pase a un plano superior.

Para ponderar la importancia de los estímulos sociales en el desarrollo de la inteligencia, hagamos un experimento mental. Imaginemos un individuo que crece sin ningún estímulo social, pero al que se le provee de toda la protección y alimentación necesarias. Viene a ser la situación en la que no existe contacto entre generaciones o en la que los juveniles se espabilan por sí solos después de abandonar el nido. Imaginemos ahora que alguna hembra de esta especie adquiere una destreza: descubre, por ejemplo, un método para cascar nueces y extraer su pulpa. Contará con más recursos. Quizá tenga más descendientes que otras hembras de la población. Pero si tal habilidad no se transfiere a la siguiente generación, desaparecerá cuando la hembra muera.



6. LAS POBLACIONES en las que los individuos tienen más probabilidades de observar a otros en acción muestran una mayor diversidad de destrezas aprendidas que las poblaciones que ofrecen menos oportunidades de aprendizaje. La relación sirve tanto para chimpancés como para orangutanes.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: CAREL VAN SCHAIK

Sea una situación en que la progenie acompaña a la madre durante cierto tiempo, antes de valerse por sí misma. La mayoría de los jóvenes aprenderán la técnica ideada por su madre y así la transmitirán (junto con los beneficios concomitantes) a la siguiente generación. Por lo general, este proceso se encontrará en especies de desarrollo lento y asociación prolongada entre progenitores (uno al menos) y prole. Recibirá un impulso vigoroso si varios individuos forman grupos socialmente tolerantes.

Podemos avanzar un paso más. Para animales de desarrollo lento que viven en sociedades tolerantes, la selección natural tenderá a premiar, con mayor fuerza, una leve mejora en la capacidad de aprender a través de la observación más que un aumento similar en la capacidad de innovar; por una razón: en una sociedad de este tipo, el individuo avanza a hombros de las generaciones presentes y pasadas.

Cabe, pues, esperar un proceso de retroalimentación positiva, en el que los animales innoven más y desarrollen mejores técnicas de aprendizaje social. Ambas posibilidades dependen de mecanismos cognitivos semejantes. Por tanto, el constituir un ser cultural predispone a las especies que ya cuentan con algunas capacidades de innovación para evolucionar hacia una mayor inteligencia. Conclusión que nos lleva a una nueva explicación de la evolución cognitiva.

Con esta nueva hipótesis encuentra sentido un fenómeno hasta ahora inexplicable. En el transcurso del siglo pasado, menudeó el caso de personas que criaron crías de grandes simios como si se tratara de niños. Estos primates "aculturados" adquirieron un conjunto sorprendente de habilidades. Imitaban sin esfuerzo comportamientos complejos: comprendían indicaciones hechas con la mano, algo de lenguaje humano (lo que los convertía en graciosos bromistas) y dibujaban. Experimentos como los realizados en fecha reciente por E. Sue Savage-Rumbaugh, de la Universidad estatal de Georgia, con el bonobo Kanzi, han revelado capacidades lingüísticas sorprendentes [*véase* "Aparición de la inteligencia", de William H. Calvin; INVESTIGA-

ción y Ciencia, diciembre 1994]. Aunque acostumbran ser rechazados por carecer de rigor científico, esos ejemplos multiplicados revelan el asombroso potencial cognitivo que se halla latente en los grandes simios. Quizá no acabemos de apreciar del todo la complejidad de la vida en la jungla, pero, en mi opinión, estos simios aculturados pueden considerarse "superdotados". En un proceso que compendia la historia de la evolución humana, un simio que se cría como un humano asciende a cumbres cognitivas superiores a las de cualquiera de sus congéneres en la naturaleza.

El mismo razonamiento resuelve el viejo enigma de por qué muchos primates en cautividad muestran habilidad en el uso de herramientas, que a veces incluso fabrican, mientras que sus congéneres en la naturaleza parecen carecer de tales destrezas. Para explicar estas diferencias suele aducirse que los primates no necesitan herramientas en la naturaleza. Pero esta aseveración queda desmentida por observaciones de orangutanes, chimpancés y monos capuchinos que demuestran que las herramientas les permiten acceder a los alimentos más ricos de su hábitat natural o salir de apuros durante períodos de escasez. La cuestión queda resuelta si advertimos que dos individuos de la misma especie divergen en su rendimiento intelectual en función del ambiente social donde crecieron; una disparidad, además, notable.

Los orangutanes ofrecen un ejemplo claro del fenómeno. En los parques zoológicos tienen fama de ser expertos en fugas. Se las ingenian para abrir las puertas de la jaula. Sin embargo, decenios de seguimiento tenaz en la naturaleza apenas si han permitido descubrir, salvo en Suaq, logros técnicos relevantes. En general, los individuos capturados no soportan la cautividad; conservan siempre un recelo arraigado contra los humanos. Los simios nacidos en el zoológico, en cambio, toman a sus cuidadores por modelos a imitar; prestan atención a sus actividades y a los objetos esparcidos por las instalaciones. Aprenden a aprender. Acumulan así un buen repertorio de destrezas.

La predicción clave de la teoría de la "inteligencia cultural" reza así: los



7. **LOS ORANGUTANES** que medran cerca de la costa occidental de Sumatra se muestran mucho más gregarios que los simios rojos de otros lugares. Los juveniles buscan la compañía de los demás en cualquier oportunidad que se les presente.

animales más inteligentes gozan de mayores probabilidades de vivir en poblaciones en que el grupo entero adopta, de forma rutinaria, innovaciones introducidas por sus miembros.

No resulta fácil someter a prueba la hipótesis. Hay animales de linajes distintos que difieren tanto en sus inclinaciones y en su modo de vida, que no hay vara de medir y comparar. De momento, sólo cabe preguntar si los linajes que muestran señales incontrovertibles de inteligencia poseen también una cultura apoyada en la innovación, y viceversa. Reconocerse uno mismo ante un espejo, por ejemplo, constituye un signo inequívoco, aunque apenas comprendido, de autoconsciencia, un indicio de alto grado de inteligencia.

Ese criterio se ha aplicado a numerosas estirpes. Hasta la fecha, los únicos grupos de mamíferos que superan la prueba son los grandes

simios y los delfines, los mismos animales que aprenden a comprender numerosos símbolos arbitrarios y que presentan las pruebas más sólidas de capacidad de imitación, que, a su vez, constituye la base para la cultura fundada en la innovación. El uso de herramientas, flexible y basado en la innovación, constituye otra expresión de inteligencia. Muestra una distribución más amplia en los mamíferos: monos y simios, cetáceos y elefantes, todos ellos linajes en los que se registra aprendizaje social. No obstante su carácter tosco, tales pruebas respaldan la hipótesis de la base cultural de la inteligencia.

Otra predicción de interés: la predisposición a la innovación coevolucionó con el aprendizaje social. Simon Reader, de la Universidad de Utrecht, y Kevin N. Laland, de la Universidad de St. Andrews, encontraron que las especies de primates que presentan más indicios de innovación coinciden con las que muestran más indicios de aprendizaje social. Pruebas más indirectas se basan en correlaciones en distintas especies entre el tamaño relativo del cerebro (tras corregirlo estadísticamente en función del tamaño corporal) y variables sociales y de desarrollo. En varios grupos de mamíferos se ha ratificado esa idea tras analizar las correlaciones establecidas entre grado de gregarismo y tamaño relativo del cerebro.

Esta nueva hipótesis no es suficiente para explicar por qué, entre los grandes simios, sólo nuestros antepasados desarrollaron una inteligencia superior. Ello no obstante, la notable capacidad de los grandes simios de aumentar su inteligencia en ambientes culturalmente ricos hace que la brecha parezca menos formidable. La explicación de la trayectoria histórica del cambio implica numerosos detalles que han de ensamblarse concienzudamente a partir de un registro fósil y arqueológico disperso y confuso. Muchos estudiosos sospechan que la invasión de la sabana por *Homo* primitivos que andaban y que se servían de herramientas constituyó un cambio clave. Para desenterrar tubérculos y descarnar y proteger cadáveres de mamíferos de gran tamaño debían trabajar en grupo y crear herramientas y estrategias. Tales requisitos fomentaron la inventiva e interdependencia. La inteligencia acreció con prontitud.

Constituidos en humanos, la historia cultural empezó a interactuar con la capacidad innata para mejorar nuestro rendimiento. Unos 150.000 años después del origen de nuestra propia especie, expresiones refinadas de simbolismo, tales como artefactos no funcionales magníficamente trabajados (arte, instrumentos musicales y ofrendas funerarias) estaban muy extendidas [*véase* "La aparición de la mente moderna", de Kate Wong; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2005]. La explosión de la técnica en los últimos 10.000 años demuestra que los estímulos culturales desencadenan logros sin límite, todo ello con cerebros de la Edad de Piedra. La cultura construye mentes nuevas a partir de cerebros viejos.

El autor

Carel van Schaik dirige el Instituto y Museo Antropológico de la Universidad de Zúrich. Se doctoró por la Universidad de Utrecht en 1985 y culminó su formación en la de Princeton.

Bibliografía complementaria

A MODEL FOR TOOL-USE TRADITIONS IN PRIMATES: IMPLICATIONS FOR THE COEVOLUTION OF CULTURE AND COGNITION. C. P. van Schaik y G. R. Pradhan en *Journal of Human Evolution*, vol. 44, págs. 645-664; 2003.

ORANGUTAN CULTURES AND THE EVOLUTION OF MATERIAL CULTURE. C. P. van Schaik, M. Ancrenaz, G. Borgen, B. Galdikas, C. D. Knott, I. Singleton, A. Suzuki, S. S. Utami y M. Y. Merrill en *Science*, vol. 299, págs. 102-105; 2003.

AMONG ORANGUTANS: RED APES AND THE RISE OF HUMAN CULTURE. C. P. van Schaik; Harvard University Press, 2004.

CONFORMITY TO CULTURAL NORMS OF TOOL USE IN CHIMPANZEES. Andrew Whiten, Vicky Horner y Frans de Waal en *Nature* en línea; agosto 2005.

La energía fantasma y el futuro del universo

La energía oscura, a la que se debe la actual expansión acelerada del universo, podría hacer que los agujeros de gusano, conexiones entre partes separadas del espaciotiempo, creciesen hasta abarcar el universo entero

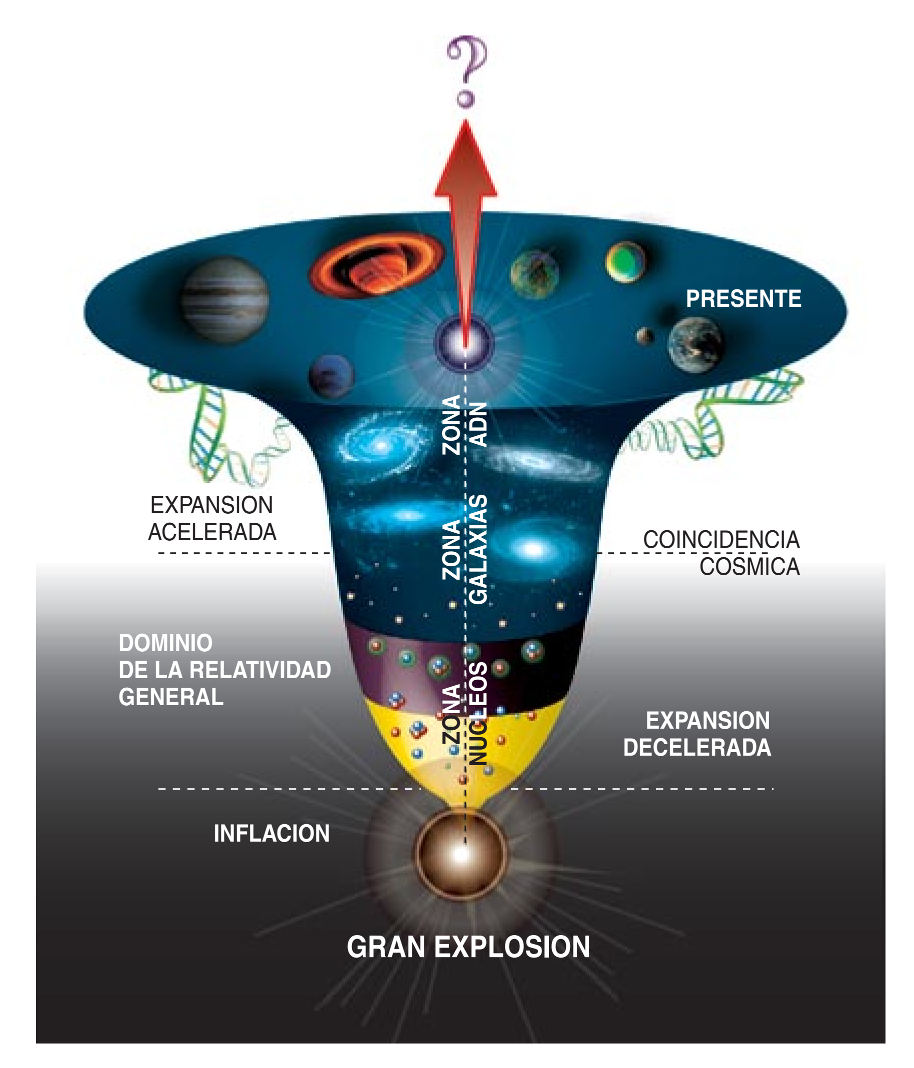
Pedro F. González Díaz

Quizás haya sido la cosmología la disciplina que nos ha ofrecido las sorpresas más llamativas en los últimos años. Y la mayor ha sido, sin duda, el descubrimiento realizado en 1998 de que, en estos momentos, el universo se está expandiendo de forma acelerada; un descubrimiento que se ha ido confirmando desde entonces cada vez con más convicción y argumentos más sólidos. Este hallazgo ha abierto a su vez una verdadera caja de Pandora, de la que están saliendo mundos posibles de características exóticas. Este artículo trata precisamente de uno de esos cuadros cósmicos.

Estudiando las características de supernovas de tipo Ia muy lejanas, dos grupos de investigación internacionales, dirigidos respectivamente por Saul Perlmutter y Adam Riess, descubrieron en los últimos años del pasado siglo que desde hace poco tiempo (en términos cósmicos, a partir de un desplazamiento hacia el rojo de la luz algo menor que 1) el universo viene sufriendo un proceso de expansión acelerada, por el cual las distancias relativas entre los objetos de comportamiento cosmológico aumentan cada vez con mayor velocidad. (Llámanse objetos con comportamiento cosmológico aquellos cuyos movimientos son pequeños con respecto al de expansión global del universo.) Las supernovas son magnas explosiones que tienen lugar durante el período final de la muerte de las estrellas. Las supernovas de tipo Ia poseen además la sorprendente propiedad de brillar con una luminosidad intrínseca que, en un alto grado de aproximación, es igual para todas. Fue esta propiedad la que aprovecharon los dos grupos mencionados para llevar a cabo la investigación —el estudio comparado y sistemático de la relación entre la distancia y el desplazamiento hacia el rojo— que les condujo a su gran descubrimiento. Desde entonces, todas las dudas que las primeras observaciones pudieron suscitar se han ido desvaneciendo, siempre en favor de la expansión acelerada, y nuevas observaciones basadas en diferentes supuestos han venido también después a corroborarla. Muy pocos cosmólogos ponen ahora en duda la validez, significado e implicaciones de este descubrimiento.

La energía oscura

Sin embargo, si bien existe ya un consenso razonable en lo que se refiere a la fiabilidad e interpretación de los resultados y de sus conclusiones, no ocurre lo mismo en lo que atañe a las causas aducidas para justificar la presente aceleración del universo. En lo que sí están todos los científicos de acuerdo es en algo ya de por sí muy sorprendente: no parece que baste la teoría general de la relatividad para describir con perfecta coherencia este tipo



1. LA EVOLUCION DEL UNIVERSO a partir de la gran explosión pasa por distintas etapas. Inicialmente, el universo sufre un proceso de expansión superacelerada, o inflación, que le dota de la uniformidad que es posible observar ahora. La fase inflacionaria, muy corta, se conecta suavemente con un largo período de expansión decelerada, gobernado por la relatividad general, que se extiende hasta que la energía oscura empieza a dominar, en un momento (el "tiempo de coincidencia cósmica") bastante próximo ya a nuestro presente. A partir de ese momento, el universo vuelve a expandirse de forma acelerada; esta situación se mantiene en la actualidad y, previsiblemente, en el futuro, aunque no se sabe por cuánto tiempo. A lo largo de estos períodos, se van generando sucesivamente todos los elementos, compuestos y estructuras observables. En primer lugar, los núcleos de los elementos más ligeros, luego los átomos, después se encienden las galaxias (cuyos gérmenes provienen del período inicial inflacionario), y, por último, se producen las condiciones necesarias para que aparezca la vida.

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ

de comportamiento. En efecto, tal como descubrió el matemático ruso Aleksandr Friedmann en 1922, para una distribución de materia isótropa y homogénea, que es la distribución que caracteriza al universo como un todo, las ecuaciones de Einstein predicen un universo en expansión decelerada; es decir, un universo que no deja de expandirse, aunque cada vez a menor velocidad. Ante esta situación, se han adoptado dos posturas esencialmente diferentes. Por un lado, existe un grupo minoritario de cosmólogos que considera que la teoría general de la relatividad debe modificarse de forma que prediga lo observado sin necesidad de incluir ningún tipo de fluido o campo de fuerzas extra. Pero, por otro lado, la mayoría considera más razonable el punto de vista contrario; es decir, se adhieren a la idea de que, para explicar los resultados de las observaciones de las supernovas de tipo Ia distantes, es preciso introducir un fluido cósmico repulsivo que se contraponga a la acción atractiva de la gravedad de Einstein, aportando una energía del vacío de origen misterioso que ha venido a conocerse como energía oscura.

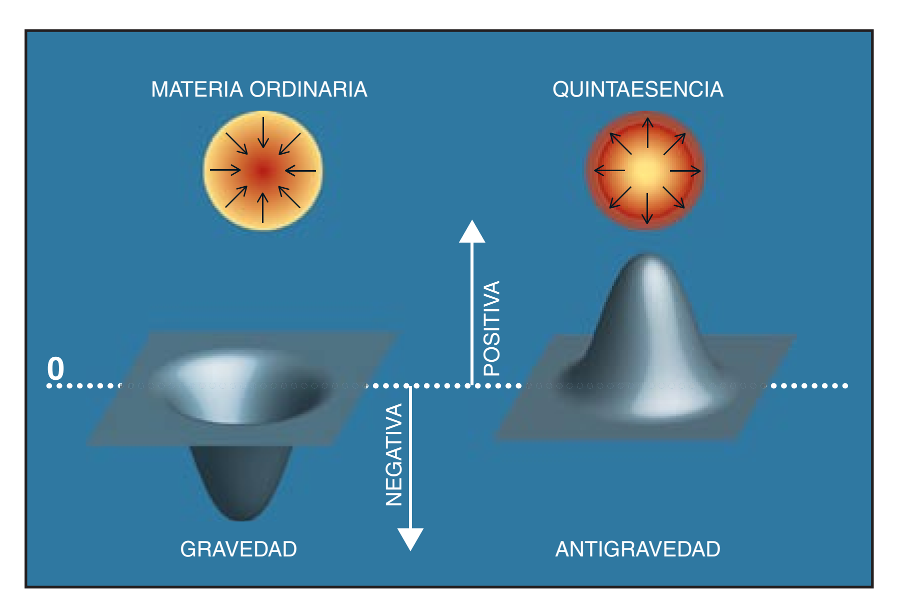
Existen en realidad muchos tipos posibles de energía oscura. El primero que se consideró fue el ligado a la constante cosmológica. La historia de esta constante es bien conocida. La introdujo el mismo Einstein en 1917, poco después de terminar la elaboración del magnífico edificio lógico-matemático de la relatividad general. Albert Einstein consideró que esta teoría adquiría una estructura más general si se añadía un término constante a sus célebres ecuaciones de campo gravitatorio. Lo hizo con un objetivo concreto: permitir que las soluciones cosmológicas de su ecuación fueran estáticas, de modo que describiesen un universo eterno y siempre igual; no obstante, como demostró Georges Lemaître años más tarde, dicho tipo de universo es inestable. El empeño de Einstein respondía en realidad a la creencia, ampliamente compartida por los científicos y filósofos de aquellos años, en la perfección del universo en el que vivían. Sin embargo, el posterior descubrimiento de Hubble —en 1929— de que el universo sigue un proceso continuo de expansión hizo que Einstein retirara la constante cosmológica; lamentó su inclusión como el mayor error de su vida. A pesar de ello, la constante cosmológica ha resucitado después en diversas ocasiones. Unas veces, para colaborar con la atracción gravitatoria; otras, cuando su valor es positivo, para oponerse a la misma. Este último es el caso aducido para justificar la expansión acelerada actual, y también la que se supone tuvo lugar en los primeros instantes del universo y que, bajo el apelativo de "inflación primordial", permitió que el universo adquiriera la uniformidad que observamos ahora.

Existe una solución famosa de las ecuaciones de Einstein para un universo con constante cosmológica y que no contenga materia. Fue descubierta por Willem de Sitter en el mismo año de 1917. La constante cosmológica desempeña en ella el papel de agente antigravitatorio (repulsivo); el correspondiente universo se expandiría de forma acelerada. Esta solución se ha utilizado muchas

veces en cosmología; incluye entre sus utilidades la que aún presta a la descripción del proceso de inflación primordial.

Sin embargo, el uso de esta constante plantea un grave problema a los teóricos. Puesto que debe interpretarse como una medida de la energía del vacío cuántico, sería de esperar un valor muy grande para la misma, un valor que, en cualquier caso, resultaría mucho mayor que el que se le exigiría, por ejemplo, para justificar la expansión acelerada del universo actual. A esta grave dificultad, o "problema de la constante cosmológica", se debe principalmente que los físicos continúen explorando muy activamente las otras posibilidades que se han ofrecido para la descripción de la energía oscura. Y entre éstas, la más popular es la ofrecida por la llamada "quintaesencia". A semejanza del quinto elemento añadido por los filósofos griegos de la Antigüedad para establecer el constituyente del mundo supralunar, la quintaesencia permitiría, junto con la materia visible y la materia oscura, una descripción completa del contenido energético del universo. Por lo normal, la quintaesencia se representa como un campo sencillo, que en términos técnicos se denomina campo escalar, φ, o como un fluido perfecto caracterizado por una presión negativa, P, y una densidad de energía positiva, ρ. [Para entender qué es una presión negativa, imagínese un globo en expansión que, en vez de contener moléculas que, con sus golpes sobre la membrana, lo hinchasen, estuviera conectado a unos muelles estirados que tirasen de él hacia el centro.] P y ρ pueden, a su vez, definirse en función del campo φ y se relacionan entre sí por medio de un parámetro constante, ω, según dicta la ecuación de estado para la energía oscura del universo, $P = \omega \times \rho$. Si, como se cree, la energía oscura domina sobre todas las demás formas de energía en el universo presente, esta fórmula tan sencilla, junto con las ecuaciones de Einstein (no tan sencillas), constituye toda la información que necesitamos para deducir de manera razonablemente aproximada el curso evolutivo del universo.

En el caso de que ω sea exactamente igual a –1, y por lo tanto $P = -\rho$, el campo escalar φ pierde todo carácter dinámico y se convierte en una constante, que coincide formalmente con la constante cosmológica. Se describe así un universo de tipo De Sitter cuya expansión es la más acelerada de las conocidas hasta hace poco. Si, por otra parte, se tiene que –1/3 es mayor que ω y ω es a su vez mayor que –1, el campo escalar φ conserva su carácter dinámico, aunque predice también una expansión acelerada. En este caso, no obstante, el ritmo al que el universo se acelera es más lento que el que imparte la constante cosmológica. Este intervalo corresponde al dominio de la energía oscura, donde el campo de quintaesencia ha sido estudiado más exhaustivamente, tanto para valores constantes del parámetro ω como para la situación, más general, en la que dicho parámetro cambia con el paso del tiempo.



2. GRAVEDAD Y ANTIGRAVEDAD son fuerzas cuyo dominio se va alternando a lo largo de la evolución del universo. La gravedad, predominante en el curso de casi toda esa evolución, se describe mediante la teoría general de la relatividad de Einstein; es una fuerza atractiva que afecta a la materia ordinaria y se caracteriza por una energía potencial negativa. El régimen antigravitatorio domina sólo durante el comienzo y final de la evolución, cuando predomina un tipo especial de fluido cosmológico o "quintaesencia", caracterizado por presiones negativas e interacciones repulsivas; aquí, la energía potencial es positiva. La quintaesencia constituye una forma de energía oscura; otras son la constante cosmológica y la energía "fantasma".

La energía fantasma y el ocaso catastrófico

En los últimos cuatro años se han realizado diversas observaciones, más o menos sistemáticas, con el objetivo de determinar, o al menos acotar, el valor del parámetro ω de la ecuación de estado del universo. Los valores obtenidos hasta ahora poseen una barra de error que hace compatible la ecuación de estado del universo con la que corresponde a un campo de quintaesencia para valores de ω menores que –0,8, lo que incluye a la constante cosmológica, mientras que no excluye un nuevo dominio de valores de ω definidos dentro del intervalo $-1{,}4 < \omega < -1$. Este último intervalo correspondería a expansiones superaceleradas del universo, más allá incluso de lo que predice la constante cosmológica. En este régimen, se ha dado a la energía oscura la denominación de "energía fantasma". La evolución futura del universo presenta en él aspectos que pudieran ser incluso inquietantes.

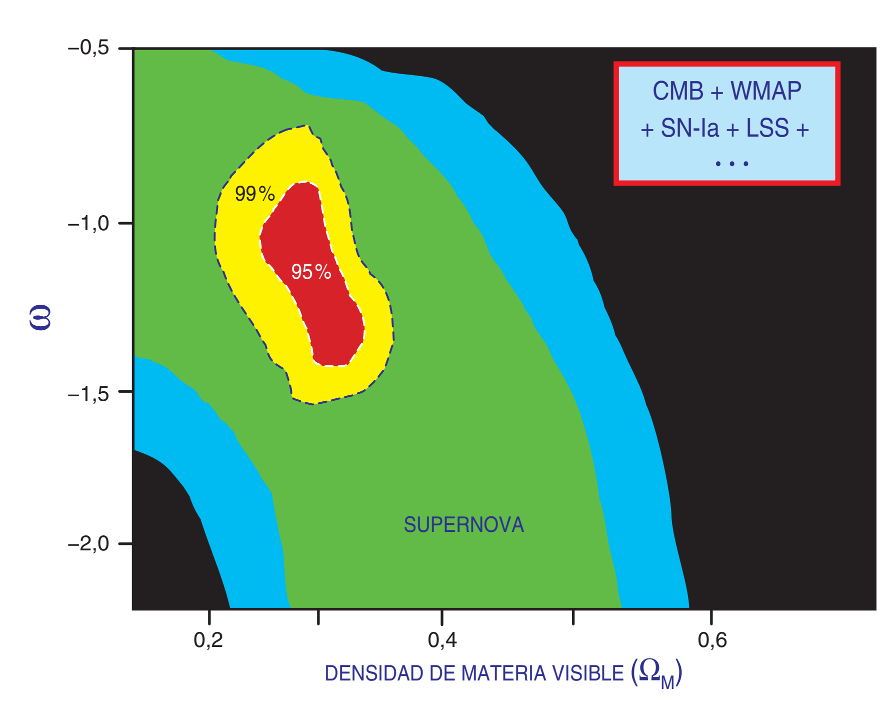
En efecto, si ω resultara ser menor que –1, el universo llegaría a expandirse a un ritmo tal, que cualquier volumen de espacio que puede delimitarse en él se convertiría en infinito en un tiempo finito de nuestro futuro. A este ocaso catastrófico, auténtico desgarrón espaciotemporal (*big rip*), y a los acontecimientos que desembocarían finalmente en tal

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ

catástrofe han dedicado numerosos estudios Robert Caldwell y sus colaboradores. Estos autores concluyeron que para un valor del parámetro de la ecuación de estado próximo a $\omega = -3/2$ y para los valores de los demás parámetros cosmológicos que corresponden a las condiciones más naturales posibles, ese ocaso catastrófico ocurriría dentro de unos 22.000 millones de años, algo que en verdad no sería inquietante ni para nosotros ni para nuestros descendientes.

En realidad, nuestro sistema solar habría desaparecido muchos años antes de que ocurriera dicho cataclismo, debido a otras causas bien conocidas. Pero Caldwell y sus colaboradores pusieron de manifiesto además que el gran acontecimiento final vendría precedido por una sucesión de hechos, todos ellos catastróficos, conforme el universo fuera acercándose a su dilución final. Si existiera alguna civilización en alguna estrella de nuestra Vía Láctea o de otra galaxia por entonces, observaría primero cómo la Vía Láctea, o la galaxia correspondiente, desaparecería más allá de su horizonte; luego vería desaparecer su sol y sistema planetario, después su propio planeta se esparciría hasta el infinito,... y así hasta que las mismas partículas elementales que formaran los cuerpos de los individuos de esta hipotética civilización se alejasen distancias infinitas entre sí, inmediatamente antes del ocaso definitivo (*big rip*), después del cual nada quedaría del universo.

Si la energía oscura que parece dominar nuestro universo estuviera en la forma conocida como energía fantasma, un nuevo fenómeno único e imponente ("big") tendría que añadirse a los ya existentes en cosmología: la gran explosión, la gran implosión y el ocaso final conformarían la trilogía cósmica de lo más grandioso. La gran explosión marcaría el inicio del universo, mientras que los dos sucesos restantes representarían formas diferentes de describir su final. La gran explosión y el ocaso final corresponden estrictamente a una singularidad matemática, un punto del espaciotiempo donde fracasan todas las leyes de la física y aun las de la biología y las demás ciencias. Estas características dantescas están presentes en la descripción clásica cuando no se tienen en cuenta las leyes de la teoría cuántica. Si dispusiéramos de una teoría de la gravedad cuántica de la que pudiésemos extraer soluciones cosmológicas coherentes, quizá se podría esperar que, aunque las leyes de la física que nos son familiares dejaran de cumplirse a medida que nos acercáramos al principio o al fin del universo, tales leyes serían entonces reemplazadas por otras. Estas, pese a ser mucho más extrañas y ajenas a nuestra experiencia cotidiana, serían leyes al fin y al cabo y tendrían la envidiable propiedad de mantener su vigencia incluso en los momentos inicial y final del universo.

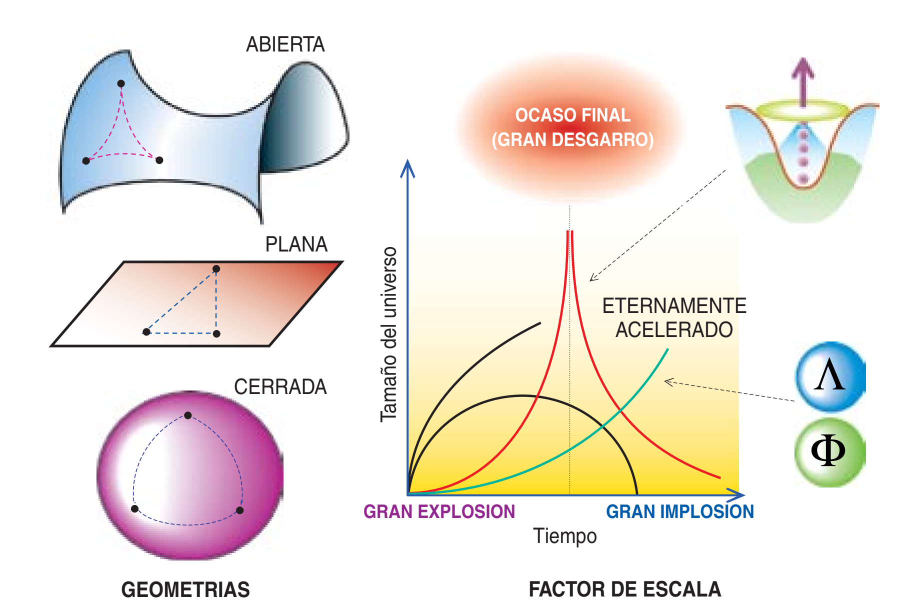


3. DETERMINACION CONJUNTA DE ω Y Ω_M gracias a los resultados obtenidos por diversas misiones: CMB (Radiación Cósmica de Fondo), WMAP (Sonda Wilkinson para Anisotropías del Fondo de Microondas), LSS (Estructura a Gran Escala y Lentes Gravitatorias), SN-Ia (Supernovas del tipo Ia Distantes), etc. ω es el parámetro de la ecuación de estado de la energía oscura y Ω_M es la densidad de materia (visible + oscura). De acuerdo con este gráfico, los valores más probables de ω y Ω_M han de situarse en la región en rojo (con el 95 % de confianza estadística) o amarilla (con el 99 % de confianza). En cualquier caso, estos valores tienen que situarse en el entorno de 0,3 y de –1 (o un poco inferior), respectivamente. Nótese que $\Omega_M + \Omega_\rho$ (la densidad de energía oscura) parece ser aproximadamente 1 (valor que corresponde a un universo plano), así que Ω_ρ ha de valer más o menos 0,7.

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ

La energía fantasma añade, pues, un nuevo modelo cosmológico clásico a los ya existentes. Atendiendo a su geometría, el universo puede ser plano, cerrado o abierto. De acuerdo a cómo varía su tamaño a medida que evoluciona, el universo puede a su vez comportarse como abierto o cerrado. En este último sentido, el modelo del ocaso final (*big rip*) es un modelo abierto; mas, en contraposición al modelo abierto ordinario, donde cualquier volumen del universo se hace infinito en un tiempo también infinito, alcanza un tamaño infinito en un tiempo finito.

Ya sabemos que la gran catástrofe futura (*big rip*) no debe preocuparnos ni por nuestra seguridad, ni por la de nuestros descendientes, dado que parece que en ningún caso podría afectarnos ni a nosotros, ni a ellos. Sin embargo, la vida, y las nuevas civilizaciones que engendrase, podrían prender de nuevo en otros lugares de nuestro universo en un futuro suficientemente lejano como para que la amenaza de dicho ocaso fuera real para tales civilizaciones. En este punto cabe preguntarse: ¿Sería inevitable el ocaso final para estas hipotéticas civilizaciones futuras? ¿Habrían de perecer sus componentes inexorablemente en la gran catástrofe si ω fuera menor que –1? Aun en el caso de que



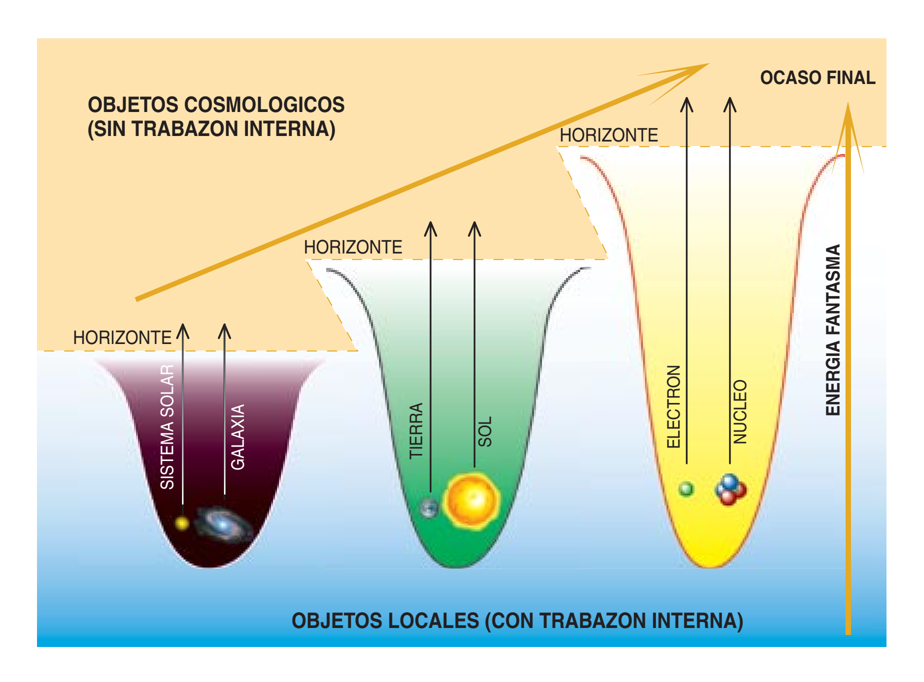
4. LOS MODELOS COSMOLOGICOS. En lo que se refiere a la variación del factor de escala del universo con el tiempo, los modelos cosmológicos incluyen los conocidos modelos abierto y cerrado (*líneas en negro*), el de expansión acelerada (*línea verde*), inducida por la presencia de una constante cosmológica (Λ) o de un campo escalar de quintaesencia (Φ), y el modelo del ocaso final (*líneas rojas*), inicialmente en expansión superacelerada y luego en contracción, tras la singularidad (el *gran desgarro*, que supondría el final del universo y de todas las leyes de la física y, por supuesto, de la biología). Este último modelo se induce por la presencia dominante de la energía fantasma. No hay que confundir estos modelos con las posibles geometrías, abierta, cerrada y plana, del universo (*a la izquierda en la figura*).

no se consideren las modificaciones que la teoría cuántica induciría en el marco del ocaso final, veremos más adelante que las hipotéticas civilizaciones del futuro podrían tener a su disposición ciertas formas de evitar la catástrofe y que estas vías de escape se basan en posibilidades no menos sorprendentes.

Las observaciones llevadas a cabo para la determinación del parámetro ω indican que toma un valor muy próximo a –1. Pero si finalmente ω no llegase al valor –1, aunque sólo fuera por una cantidad pequeñísima, todo lo dicho anteriormente sobre el modelo del ocaso final (*big rip*) conservaría su validez. Dado que, por otra parte, no es previsible que dispongamos a corto plazo de procedimientos que nos ofrezcan observaciones tan precisas y sistemáticas que nos permitan discriminar entre valores de ω muy próximos, es de temer que la incertidumbre que hoy existe a la hora de decidir entre los modelos de quintaesencia, constante cosmológica y energía fantasma no pueda resolverse en mucho tiempo.

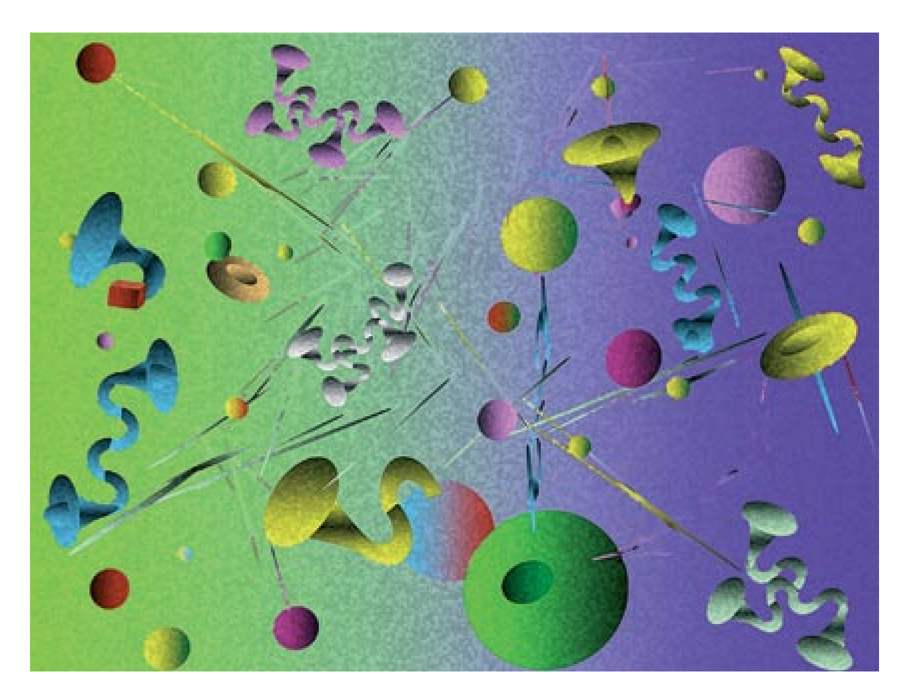
Pero si, pese a ello, alguien insistiera en mantener la energía fantasma como su modelo favorito, debería saber que dicho fluido, aparte de predecir una singularidad futura del tipo del ocaso final, tiene otras propiedades que también son muy poco corrientes. Conviene resaltar aquí algunas. Por una parte, resulta difícil de concebir que, pese a describir un universo cuyo tamaño aumenta tan rápidamente, la energía fantasma posea una densidad de energía positiva que aumenta con el tiempo sin violar el principio de conservación de la energía.

Por otra parte, puesto que el valor absoluto de su presión negativa es mayor que el de su densidad de energía positiva, la energía interna del fluido fantasma resulta ser negativa, de forma tal que la energía de un sistema ordinario que absorbiera energía fantasma tendría que disminuir necesariamente. Esta última característica se traduce además en la violación de uno de los principios sacrosantos de la física, el llamado principio de la energía dominante: el valor absoluto de P ha de ser menor que ρ. En efecto, en el caso de la energía fantasma la suma de la presión y la densidad de energía, P + ρ, debe ser siempre negativa.



5. LA ENERGIA FANTASMA, a medida que el universo se aproxima al ocaso final, convierte los objetos locales, cuyos movimientos no siguen individualmente leyes cosmológicas, en objetos cosmológicos que las obedecen por sí mismos. Ocurre primero con los objetos de mayor tamaño y, luego, con objetos cada vez menores.

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ



6. LA ESPUMA ESPACIOTEMPORAL, representada aquí en forma figurada, es un hervidero continuo de actividad creadora y aniquiladora, a la que está sometida una ingente cantidad de objetos submicroscópicos de vida efímera que corresponden a todo tipo de posibles topologías y formas energéticas. No es posible asignar una flecha del tiempo a esta espuma de vacío cuántico, ya que en él no existen leyes de causalidad en las que la causa preceda necesariamente al efecto, ni verdadera ordenación espacial de los objetos.

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ

Túneles en el espaciotiempo

Existe otro tipo de soluciones de las ecuaciones de Einstein que violan también el principio de la energía dominante. Se trata de los agujeros de gusano o de anillo lorentzianos, túneles imbricados en la propia estructura del espaciotiempo. Corresponden a soluciones de las ecuaciones de Einstein para una distribución esférica, en el caso de los agujeros de gusano, o toroidal, en el de los agujeros de anillo, de materia exótica. Las propiedades de este tipo de materia son, en cierto sentido, muy parecidas a las de la energía fantasma. No resulta extraño imaginar que un universo dominado por energía fantasma contuviera también de forma natural ejemplares de estos agujeros de gusano y de anillo distribuidos por todo su volumen. Veremos a continuación lo que podría ocurrirles a estos túneles espaciotemporales durante la evolución del universo.

Un agujero de gusano viene a ser un túnel en el espaciotiempo que une dos regiones extensas de un mismo universo —o de distintos universos, es decir, distintos continuos espaciotemporales sin otra conexión que ésa—, a las que se abre por una boca de entrada y una boca de salida. Estos túneles poseen una garganta de tamaño finito; corresponde a la sección más estrecha del túnel; en dicha garganta se concentra la materia exótica en una distribución esférica (o toroidal en el caso de un agujero de anillo), que impide que el agujero se estrangule por su centro y lo convierte, por consiguiente, en un túnel estable que puede ser atravesado de una a otra boca por cualquier viajero de tamaño suficientemente pequeño.

Estos túneles espaciotemporales pueden convertirse en una máquina del tiempo: los viajeros que los atraviesen viajan "instantáneamente" hacia el futuro o hacia el pasado. Basta para ello con imponer un cierto movimiento relativo entre las dos bocas del agujero. Este movimiento conduce a la aparición en el interior del túnel de un horizonte cronológico. Se trata de una superficie, situada en las proximidades de la garganta, a partir de la cual todo viajero que atraviese el túnel se encontrará en una región donde se produce una violación sistemática de la causalidad. Tal violación se debe al fenómeno relativista de la dilatación del tiempo, por el que dicho viajero evolucionaría instantáneamente hacia su propio pasado o futuro, dependiendo del tipo de movimiento relativo entre las bocas.

Desde 1989, año en que Kip Thorne los obtuvo como soluciones de las ecuaciones de Einstein, estos extraños objetos espaciotemporales se han convertido en tema de investigación. No obstante, está aún lejos el día en el que una civilización mucho más avanzada que la nuestra sea capaz de generar una técnica tal que permita disponer de estos túneles y haga viable viajar en el tiempo a través de ellos. Por otra parte, los agujeros de gusano y de anillo presentan un considerable problema de estabilidad, que se pone de manifiesto cuando se consideran las fluctuaciones cuánticas del vacío en presencia de estos objetos espaciotemporales. Diversos cálculos demuestran que ciertas magnitudes que caracterizan a esas fluctuaciones cuánticas divergen (es decir, se hacen infinitas) a medida que nos aproximamos al horizonte cronológico. Por esa razón, los agujeros de gusano y de anillo resultan inestables.

Steven Hawking elevó este tipo de cálculos a la categoría de conjetura científica, bajo el nombre de "conjetura de protección cronológica", de acuerdo con la cual las leyes de la física cuántica prohíben la existencia de máquinas del tiempo. No obstante, a pesar de tener en cuenta las fluctuaciones cuánticas del vacío, la conjetura de Hawking tiene una naturaleza esencialmente semiclásica, lo que quiere decir que sólo se aplica al caso de máquinas del tiempo cuya geometría no venga descrita de acuerdo con las leyes de la teoría cuántica. Se ha demostrado después que, si se considera la geometría cuántica de tales objetos, éstos se comportan de forma estable, incluso en presencia de las fluctuaciones del vacío, siempre y cuando la garganta de los túneles tenga un tamaño submicroscópico, es decir, corresponda a escalas menores que las que caracterizan a las partículas elementales.

El vacío clásico de la gravedad puede describirse como la ausencia

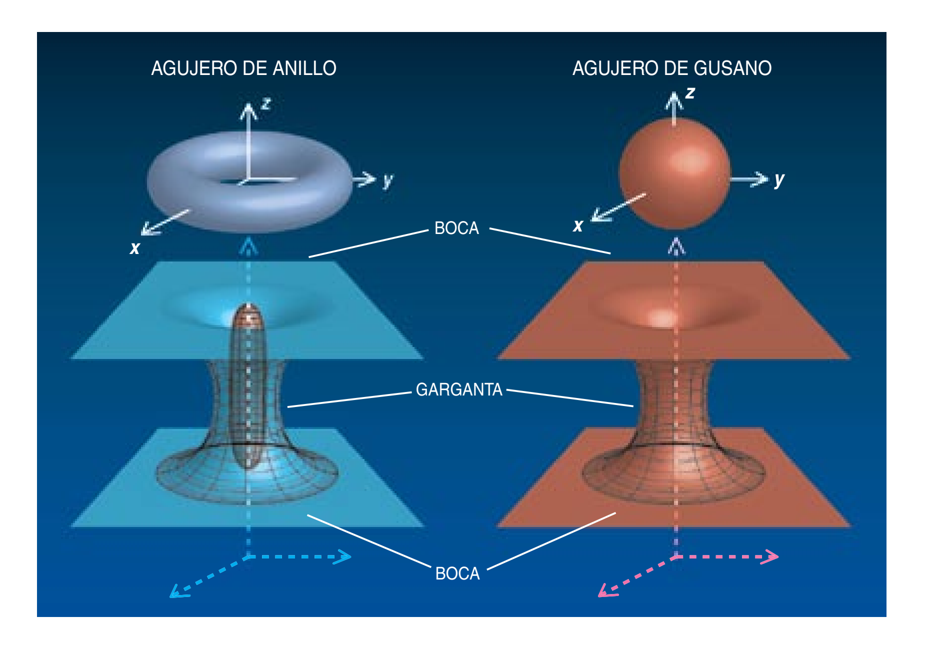
total de espacio, tiempo y materia. Sin embargo, si consideramos una vez más las características de la teoría cuántica, el vacío gravitatorio se convierte en una "espuma cuántica espaciotemporal", un lugar repleto de actividad de una naturaleza no causal, que abandona el carácter de ausencia absoluta propio de la descripción clásica para llenarse con la presencia de todo tipo de objetos geométricos y topológicos de vida fugaz y tamaño submicroscópico. Así, proliferan agujeros negros virtuales en continua creación y aniquilación, universos fugaces siempre recién nacidos y que acaban de perecer, cuerdas cósmicas diminutas, membranas y, finalmente, como depositarios de todo elemento de violación de la causalidad y garantía para la espuma de que no hay efecto que no pueda preceder a su causa, diversos tipos de túneles espaciotemporales submicroscópicos. Una forma previsible de técnica del futuro, la más obvia tal vez, y con la cual civilizaciones venideras podrían disponer de máquinas del tiempo, consistiría en extraer de la espuma cuántica espaciotemporal estos agujeros y aumentarlos hasta un tamaño macroscópico, conservando sus características geométricas y cuánticas.

Pero aunque esto llegara a ser posible algún día, los viajeros del tiempo deberían enfrentarse con otro problema. Para realizar un viaje a través del tiempo un viajero tendría que pasar por el túnel desde una boca a otra, atravesando así necesariamente la garganta, una zona donde se concentra la materia exótica, cuyas características parecen incompatibles con la vida que conocemos. No es posible encontrar ningún atajo libre de materia exótica en el caso de un agujero de gusano. Sin embargo, los agujeros de anillo disponen de vericuetos a través de los cuales es posible ir de una a otra boca sin encontrar materia exótica. El problema en este caso quedaría reducido a saber distinguir desde el exterior estos itinerarios "seguros".

Crecimiento espontáneo de los túneles

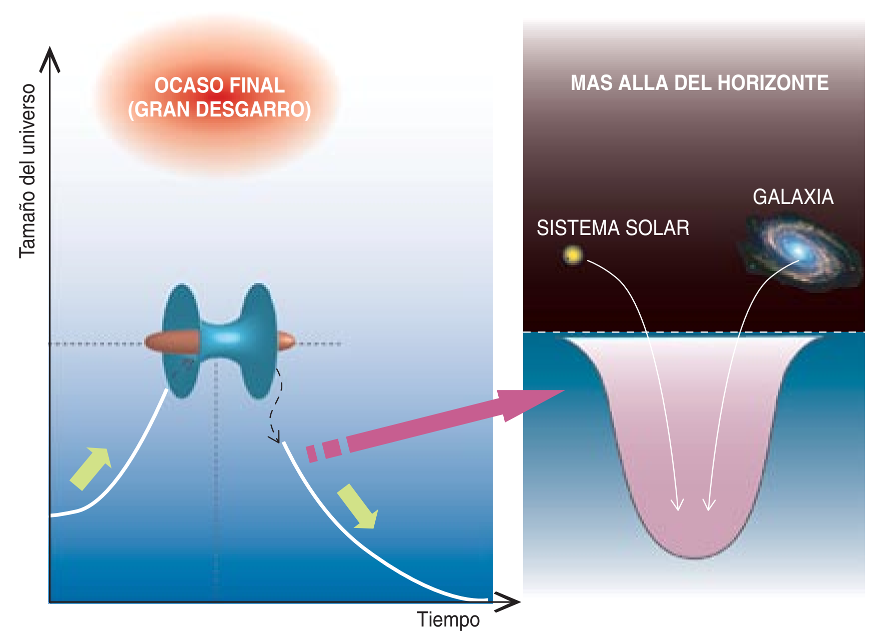
¿Qué le ocurre a uno de estos agujeros de gusano o anillo cuando se encuentra inmerso en un universo que, como el presente, está dominado por energía oscura? Se han esbozado dos propuestas completamente diferentes. Nos ocuparemos a continuación de la primera, dejando la segunda para el final. Si sólo se tienen en cuenta los efectos que la expansión acelerada del universo tiene en la geometría y tamaño de los agujeros de gusano o anillo, se llega a la siguiente conclusión: el tamaño de la garganta de los agujeros de gusano y anillo inmersos en un universo que contiene energía oscura aumenta en un factor proporcional al factor de escala del universo con respecto al sistema de referencia del espacio inicial en que están inmersos. (Por factor de escala se entiende el factor en que las distancias cósmicas se dilatan, en función del tiempo, a consecuencia de la expansión del universo.) Con otras palabras: todos los agujeros aumentan de tamaño en la misma proporción en que aumenta de tamaño el universo, mientras que su estructura y forma geométrica permanecen inalteradas. Todo ocurriría como si esa técnica futura a la que antes aludíamos fuera un recurso del que la propia naturaleza dispone por sí misma y mediante el cual, para llegar a contar con una máquina del tiempo de tamaño macroscópico, no habría más que esperar que pasara un tiempo suficiente. Lo único que tendría que hacer entonces el hipotético viajero sería aprender a identificar el lugar donde se encuentra la boca de entrada de un agujero, comprobar su tipo, identificar los itinerarios seguros a través del túnel y, finalmente, fijar la velocidad relativa entre las bocas.

Pero, ¿esperar cuánto? Obviamente, cuanto menor sea el parámetro ω que caracteriza la ecuación de estado de la energía oscura, mayor será el ritmo al que se expande el universo y, por tanto, el ritmo de crecimiento de los agujeros. Sin embargo, como el tamaño de partida de la garganta de un agujero de gusano o anillo, al principio en la espuma cuántica espaciotemporal, es extraordinariamente pequeño (poco mayor que la longitud de Planck, 10^{-33} cm, la escala donde los fenómenos cuánticos empiezan a predominar sobre la gravitación clásica), si ω fuera mayor que -1, el tiempo que habría que esperar para que la naturaleza preparara una máquina del tiempo adecuada sería inimaginablemente



7. LOS AGUJEROS DE ANILLO Y DE GUSANO corresponden a soluciones de las ecuaciones de Einstein para distribuciones de materia exótica con simetría toroidal y esférica, respectivamente. Las propiedades de la materia exótica son similares a las de la energía fantasma. Por ese motivo, los túneles pueden formarse de manera natural en un universo donde la energía fantasma domine sobre los demás tipos de energía. Los agujeros de anillo y de gusano cortocircuitan el espaciotiempo conocido al conectar sus bocas a puntos ilimitadamente distantes entre sí, permitiendo viajar entre dichos puntos, y a través del tiempo, hacia el futuro o el pasado.

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ



8. **REPRESENTACION ESQUEMATICA** del uso, por una hipotética civilización avanzada del futuro, de un agujero de anillo macroscópico para evitar el "gran desgarro" (*big rip*). Una vez identificada la boca de entrada al agujero, los científicos de dicha civilización podrían conectarse a la zona futura en contracción cortocircuitando el espaciotiempo del universo entre dos puntos del mismo e imponiendo un movimiento relativo conveniente entre las bocas. Por la boca de salida llegarían así a la región futura, donde la contracción del universo iría recuperando paulatinamente los objetos astrofísicos perdidos más allá del horizonte antes de ese viaje.

largo. Durante el tiempo invertido por la garganta del túnel para crecer hasta un tamaño suficiente, el universo habría evolucionado hasta convertirse en un lugar donde a duras penas cabría concebir una noción de vida o civilización. La situación diferiría si en el universo dominara la energía fantasma. En tal caso, el ritmo de crecimiento del universo llegaría a ser tan considerable, que el tamaño de la garganta de los agujeros de gusano o anillo podría alcanzar un tamaño macroscópico incluso un poco antes de que se produjera el ocaso final (*big rip*).

Manual para evitar la catástrofe

Al concluir nuestro análisis del ocaso final, nos preguntábamos: ¿Será una catástrofe inevitable para las futuras civilizaciones que puedan existir cuando nuestro universo haya envejecido unos 22.000 millones de años? ¿Habrían de perecer tales civilizaciones inexorablemente en esta gran catástrofe si ω es menor que –1? De lo que acabamos de decir se deduce que la presencia de agujeros de gusano y anillo con una garganta de tamaño macroscópico les podría todavía ofrecer un camino de escape adecuado y seguro en el último minuto.

Desde un punto de vista matemático, la singularidad futura a la que llamamos ocaso final divide la evolución del universo en dos partes. Ya sabemos que antes de ese episodio, el universo se expande de forma superacelerada. Después del ocaso final, entraría en un período de contracción continuada que le habría de conducir paulatinamente hasta un tamaño cero a lo largo de un tiempo infinito. No obstante, puesto que el suceso en cuestión corresponde a una singularidad matemática, no es posible establecer ninguna continuidad causal entre ambos períodos.

La singularidad pone fin al período de evolución causal del universo y no tiene sentido preguntarse cómo éste podría reanudar después una evolución causal. O mejor dicho, no tiene sentido siempre que no haya una conexión, basada en procesos no gobernados por la causalidad, que lleve al universo desde un momento antes a un momento después del ocaso final a través de un cortocircuito del espaciotiempo. En este caso, la evolución acelerada previa podría ser continuada por la contracción posterior. Si las hipotéticas civilizaciones futuras que existieran en tiempos previos al ocaso final identificaran las bocas de entrada de los agujeros de anillo, podrían viajar a través de ellos a su futuro para reencontrarse en un universo donde irían recuperando poco a poco todo lo que antes se les había ido escapando más allá del horizonte: el sistema planetario, la galaxia, etc.

Si tales civilizaciones controlasen el movimiento relativo de las bocas de los agujeros, en teoría podrían viajar hasta su pasado. Sin embargo, mientras los viajes al futuro no plantean graves problemas de causalidad, los viajes al pasado sí lo hacen. Son bien conocidas las paradojas que surgen. El viajero que mata a su abuelo antes de que éste hubiera podido engendrar a su propio padre es el arquetipo de las mismas. Y si este tipo de dificultades llegaran a resolverse, siempre se puede aducir el argumento pragmático de Steven Hawking: los viajes al pasado no serán nunca posibles ya que jamás se han visto turistas del futuro en nuestro mundo.

Un universo que viaja en el tiempo

Como señalamos anteriormente, existe otra propuesta acerca del destino que les correspondería a los agujeros de gusano y anillo en un universo en expansión acelerada. Toma en consideración los efectos que se producen en los agujeros espaciotemporales en virtud de la acreción gravitatoria de energía oscura. Se los ha estudiado sólo cuando los túneles espaciotemporales pertenecen al tipo de los agujeros de gusano. La acreción, o incorporación constante de energía de fuera mediante la simple interacción gravitatoria, es el único fenómeno físico mediante el cual un objeto espaciotemporal puede absorber energía oscura o fantasma.

Mientras que la acreción de energía oscura con ω mayor que –1 conduce a una disminución paulatina del tamaño de la garganta hasta su desaparición final, la acreción de energía fantasma conduce al efecto contrario,

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ

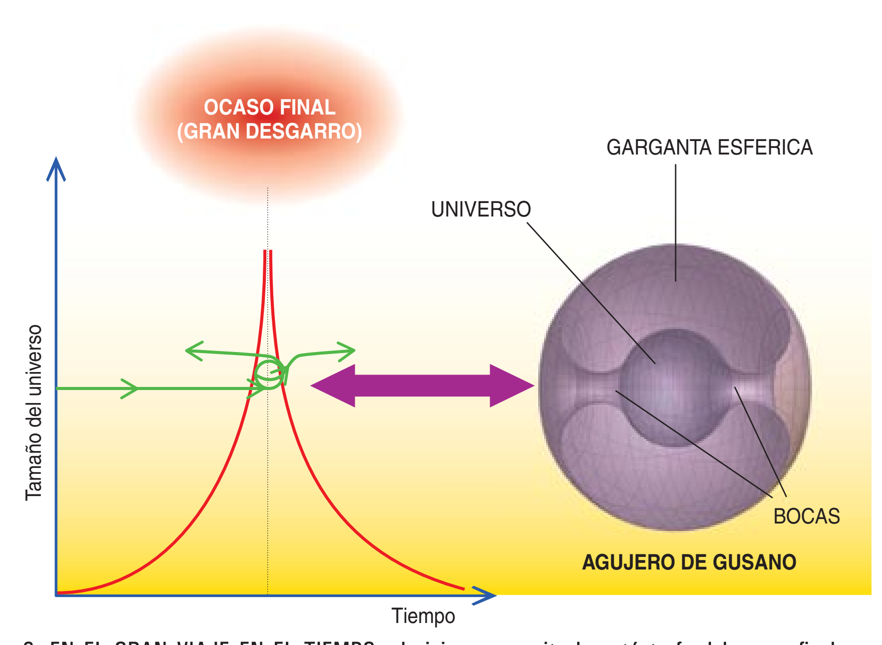
es decir, a un aumento continuado del tamaño del túnel.

La razón por la que tienen lugar fenómenos de acreción tan dispares puede entenderse fácilmente si recordamos que la energía interna es positiva para un fluido de quintaesencia con ω mayor que –1 y negativa tanto para el fluido fantasma como para la materia exótica presente en los agujeros espaciotemporales. Puesto que el tamaño de la garganta de un agujero de gusano es proporcional a la cantidad de materia exótica que contiene, dicho tamaño aumentará cuando se inyecte energía negativa y disminuirá cuando se inyecte energía positiva.

Cuesta más entender que el tamaño de la garganta aumente tan deprisa como para que llegue a abarcar cualquier volumen del universo por grande que sea, e incluso se haga infinito antes de que el universo alcance la singularidad del ocaso final. Pero esto es lo que predicen los cálculos. Si el universo se hallara ahora dominado por energía fantasma y este dominio continuara en el futuro, ese resultado sería inevitable y significaría que antes de que ocurriese el ocaso final, el universo quedaría incluido en el interior de al menos un agujero de gusano en su totalidad. Así, el universo se convertiría en un viajero con billete individual a través de su propio tiempo. En tal caso, nuestro universo podría evitar la singularidad del ocaso final que le aguardaría dentro de 22.000 millones de años. Lo haría una vez incluido en el interior de al menos un agujero de gusano, viajando instantáneamente hacia su futuro para integrarse al fin en una fase evolutiva de contracción.

Esta sería una forma de salvar de la gran catástrofe del ocaso final no sólo a las civilizaciones inteligentes que pudieran existir en el universo en sus tiempos postreros, sino al universo mismo en su totalidad. Un viaje al futuro en el que el viajero es el universo mismo merece la denominación de "gran viaje" (*big trip*). Quizás el aspecto más espectacular de este viaje resida en el hecho de referirse al viajero más macroscópico que es posible imaginar: el universo.

Este artículo tiene un carácter fundamentalmente especulativo, tanto en lo que se refiere a la posibilidad de que el universo se halle dominado por una energía oscura fantasma con características muy peculiares, como en todo lo que concierne a la física que describe los túneles espaciotemporales, con diferentes topologías, convertibles en hipotéticas máquinas del tiempo. Así, Valerio Faraoni y Werner Israel, respectivamente de la Universidad del Obispo y de la Universidad Victoria, ambas en Canadá, al estudiar la acreción de energía fantasma por un agujero de gusano en un caso un poco distinto al planteado aquí, han llegado a una conclusión muy parecida a la que, según hemos expuesto antes, se llega cuando sólo se consideran los efectos de la expansión y no se toma en cuenta la acreción: que el agujero crece al mismo ritmo al que se expande el universo. En tal caso, pues, no podrían producirse los viajes del universo como un todo. Sin embargo, quisiera recordar que la mayoría de las ideas que se consideran hoy en día probadas, al menos en cosmología, tuvieron también un fuerte carácter especulativo en sus orígenes.



9. EN EL GRAN VIAJE EN EL TIEMPO, el viajero que evita la catástrofe del ocaso final es el propio universo. Este llevaría como equipaje toda su historia y su contenido completo de galaxias, estrellas, radiación, civilizaciones futuras, etc. El fenómeno ocurriría de forma natural y estaría desencadenado por la acreción de energía fantasma en los túneles del espaciotiempo, proceso que haría crecer la garganta de los agujeros de gusano tan rápidamente que, antes de que se produjera el ocaso final, el universo quedaría incluido en el interior de un túnel y viajaría así de forma espontánea por su propio tiempo.

PEDRO F. GONZALEZ DIAZ

El autor

Pedro Félix González Díaz trabaja en el grupo de relatividad y cosmología del Instituto de Matemáticas y Física Fundamental del CSIC en Madrid desde 1992. A partir de 2000 su labor se ha concentrado en el estudio de temas relacionados con la energía oscura, mundos brana y modelos de cosmología cuántica.

Bibliografía complementaria

THE COSMOLOGICAL CONSTANT AND DARK ENERGY. P. J. E. Peebles y B. Ratra en *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, págs. 559-606; 2003.

PHANTOM ENERGY AND COSMIC DOOMSDAY. R. R. Caldwell, M. Kamionkowski y N. N. Weinberg en *Physical Review Letters*, vol. 91, pág. 071301; 2003.

WORMHOLES AND RINGHOLES IN A DARK-ENERGY UNIVERSE. P. F. González Díaz en *Physical Review*, vol. D68, pág. 084016; 2003.

Radio cognitiva

Radios inteligentes y otros nuevos dispositivos inalámbricos evitarán las congestiones en la transmisión: conmutarán de modo instantáneo a las frecuencias cercanas libres que encuentren

Steven Ashley

Una emisora de radio transmite en una determinada frecuencia y se sintoniza el receptor para captarla. Si otros transmisores interfieren la recepción, no quedará más remedio que esperar a que desaparezca el problema. En un mundo ideal, sin embargo, el receptor conmutaría de inmediato a una frecuencia de reserva que transportase también la señal deseada. Tal solución sobrepasa la técnica actual. Quizás el ejemplo que se ha puesto dé la impresión de que el asunto no es tan grave. Pero en el caso de que la interferencia interrumpa una llamada urgente hecha desde un teléfono móvil, la rápida transferencia de la llamada a un canal celular libre sería más que conveniente: podría salvar una vida.

Actualmente se trabaja para dotar de esta inteligencia operativa flexible a radios, teléfonos móviles celulares y otros futuros equipos de comunicaciones inalámbricos. De aquí a diez años, la radiocomunicación con capacidad cognitiva debería permitir a casi todos los sistemas inalámbricos localizar cualquier banda libre del espectro radioeléctrico a su alcance y conectarse a ella para atender mejor al usuario. Mediante una programación adaptable, estos dispositivos inteligentes reconfigurarían sus funciones de comunicación para satisfacer las demandas de las redes de transmisión o de los usuarios.

La radio cognitiva se apoyará en experiencias anteriores. Mientras se conduce hacia el trabajo, el sistema de a bordo medirá las características de propagación, la intensidad de la señal y la calidad de transmisión en las diferentes bandas (*véase el recuadro* "¿Me oyes ahora?"). De ese modo construirá una base de datos interna que defina la manera más conveniente de funcionar en diferentes lugares y a distintas horas del día. Por el contrario, los sistemas inalámbricos actuales operan en su mayoría con bandas de frecuencia y protocolos de transmisión prefijados.

Una estación o receptor cognitivo que envíe o reciba señales saltará ágilmente de una banda libre a otra según sea necesario, evitando las que estén ya utilizadas. Tal conmutación relampagueante de canales habrá de permitir la transmisión digital de voz y datos a velocidades razonables. Si se salvan las posibles congestiones de tráfico en las frecuencias disponibles, se utilizarán con eficacia muy superior los recursos existentes del espectro de radiofrecuencias (RF) y las comunicaciones inalámbricas ganarán mucho en fiabilidad y comodidad, y muy probablemente en economía. Si la técnica cognitiva cumple sus expectativas, aparecerán muchas opciones de utilización del espectro de RF: el espacio radioeléctrico nunca volverá a ser el mismo.

No hay sitio en el éter

Por desgracia, las ondas de radio sufren hoy día una concurrencia excesiva. Ciertas bandas tienen tal sobrecarga, que las largas esperas y las interferencias son moneda corriente. La disponibilidad

1. EN LA RADIO COGNITIVA, las señales inalámbricas saltan automáticamente a frecuencias abiertas que estén disponibles. Con ella, las transmisiones serán mucho más fiables y los costes de las comunicaciones se abaratarían.

MATT VINCENT



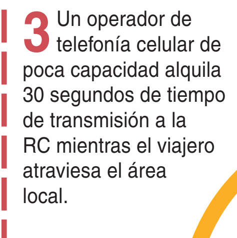
¿ME OYES AHORA?

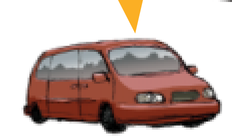
La radio cognitiva (RC) hará posible el establecimiento de conexiones que aprovechen las oportunidades disponibles en la Red inalámbrica para mantener comunicados a quienes van al trabajo o vuelven de él, sea cual sea su situación o condiciones de transmisión. Durante el trayecto de ida, el sistema RC escrutará el entorno radioeléctrico local y eligirá los mejores enlaces libres para completar las llamadas.

1 Cerca del domicilio, la RC se conectará a la red doméstica de RF del usuario para utilizar el protocolo de voz por Internet (VoIP) y acceder a la Red.

2 Un poco más allá, la RC detectará la red inalámbrica de área local (WLAN) de un vecino que le ofrece “pago en espectro” —a cambio del futuro acceso a bandas libres— por conectarse a un proveedor de servicios de Internet.

3 Un operador de telefonía celular de poca capacidad alquila 30 segundos de tiempo de transmisión a la RC mientras el viajero atraviesa el área local.





MATT VINCENT

de enlaces de transmisión depende de los sistemas inalámbricos utilizados. El espectro radioeléctrico —es decir, la parte del continuo de radiaciones electromagnéticas correspondiente a las frecuencias de radio— acomoda actualmente innumerables comunicaciones, con sus respectivas frecuencias oficialmente asignadas, entre las que se cuentan aquellas de las que todos han oído hablar, como las bandas de AM, FM y onda corta, las bandas de los radioaficionados o los canales de televisión en VHF y UHF, y otras no tan conocidas, como los centenares de bandas que atienden a los teléfonos celulares y sin cordón, las unidades de GPS, los radares de control del tráfico aéreo, las alarmas de seguridad o los juguetes controlados por radio (*véase el recuadro* “El espectro de radiofrecuencias”).

La escasez actual de espectro radioeléctrico libre proviene en buena medida de los límites de coste y prestaciones funcionales de los equipos heredados del siglo pasado. Al final de la década de los ciencuenta, por ejemplo, la persistencia de diseños propios de los televisores con tubos de vacío obligó a que los nuevos modelos transistorizados recibieran solamente señales de VHF, y así fue mientras no se pudo actualizarlo todo. Esa falta de flexibilidad, inherente al equipo físico, se combate ahora con diseños inalámbricos adaptables por medios informáticos.

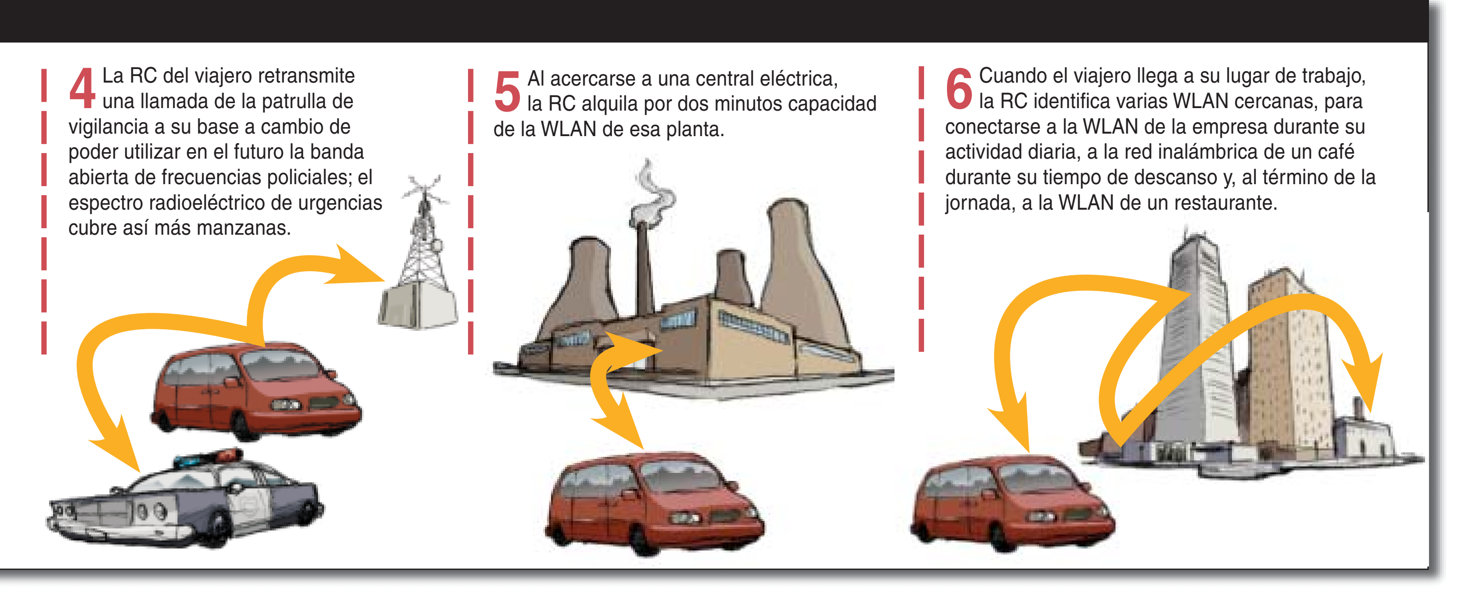
Esta generación venidera de dispositivos inalámbricos, llamada SDR (en inglés, siglas de “radio definida por programa”), utilizará, por una parte, algoritmos integrados de procesamiento de señal para discernir entre señales de radio débiles y, por otra, estructuras de código reconfigurables para recibir y transmitir nuevos protocolos de radiocomunicación. Se prevé que, en un plazo no muy largo, estos avances informáticos provocarán una alteración radical del diseño de los equipos radioeléctricos.

Gracias a esos cambios, por ejemplo, los códigos SDR y otras técnicas de radiofrecuencia programables que sirven de interfaz con el usuario, instaladas en un ordenador portátil normal que cuente con una pequeña tarjeta de interconexión de periféricos por RF, recibirán y reproducirán señales de televisión. Si al portátil se le añadiera una tarjeta SDR analógica de RF, podría remitir programas informáticos con los que funcionaría como un teléfono o una estación base celulares, como agenda personal inalámbrica o incluso como equipo de radio en frecuencias de uso militar: lo que se requiera (y esté permitido). Aunque pocos lo sepan, acabamos de entrar en la era de las comunicaciones inalámbricas SDR.

La radio cognitiva viene tras los pasos de la técnica SDR, y en ella se apoya. Este nuevo paradigma inalámbrico se concreta en unos sistemas SDR capaces de reconfigurar su salida analógica en RF, “conscientes” de su entidad individual y conocedores de protocolos, rutinas de gestión y procedimientos de transmisión. Tales

Resumen/Radios inteligentes

- La radio cognitiva es una nueva técnica de comunicaciones inalámbricas que está ahora conformándose. Detectará y se conectará a cualquier frecuencia radioeléctrica libre en las cercanías para dar mejor servicio al usuario. Conmutará desde una banda del espectro bloqueada por una interferencia a otra banda libre para completar un enlace de transmisión, lo que es de gran importancia en caso de emergencia.
- Mediante programación adaptable, estos equipos inteligentes reconfigurarán sus funciones para satisfacer las demandas de redes o usuarios de comunicaciones. Los cambios que deban efectuarse se fundarán en la capacidad de detectar y recordar factores diversos, tales como el espectro de radiofrecuencias, el comportamiento de los usuarios o el estado de la red en diferentes entornos de transmisión en cualquier momento y lugar. Esto proporcionará comunicaciones inalámbricas mucho más fiables y cómodas.
- La nueva flexibilidad que ofrece la radio cognitiva quizá llegue a permitir que los usuarios aprovechen para sus llamadas los trayectos, más económicos, de las redes locales inalámbricas: revolucionaría el mercado de las comunicaciones.



FUENTE: DEPARTAMENTO DE COMERCIO DE EE.UU.

desarrollos crearán una radio cognitiva, que, tras escrutar su entorno de RF y su localización, alterará su potencia, frecuencia y demás parámetros funcionales con miras a la reutilización dinámica de cualquier porción de espectro que haya disponible.

Que el sistema tenga "conciencia de sí" significa que es capaz de aprender sobre su propia entidad y su relación con las redes radioeléctricas en las que habita. Estas funciones pueden materializarse gracias a un modelo informático del dispositivo y su entorno que lo defina como "entidad individual" que opera como "radio"; también definirá el modelo un "usuario", acerca del cual podrá aprender el sistema.

Un equipo de radio cognitiva percibirá de modo autónomo cómo varía su entorno de RF con la posición y el tiempo en lo que se refiere a la potencia que radian él mismo y otros transmisores cercanos. Estas estructuras de datos y los programas anejos le permitirán descubrir y utilizar lo mejor posible las redes circundantes, y además evitar la interferencia de otros equipos radioeléctricos. En un futuro no muy lejano, con la radio cognitiva se compartirá el espectro disponible de una manera óptima, sin instrucciones de una red controladora, lo que en último término podría eximir al usuario de contratos y tarifas.

Las posibilidades que encierra la radio cognitiva de redefinir los servicios inalámbricos existentes se aprecian con claridad al considerar su incidencia económica. Así, una factura mensual de servicio telefónico contiene los cargos por el alquiler de espectro radioeléctrico y de las torres emisoras y por la compra del aparato telefónico, además de la amortización del equipo de la estación base celular, el coste de la interconexión entre las células, los gastos de facturación y el beneficio del operador de la red. Todos esos cargos son el pago de las inversiones realizadas por los proveedores de servicios celulares para crear y explotar redes de RF especializadas.

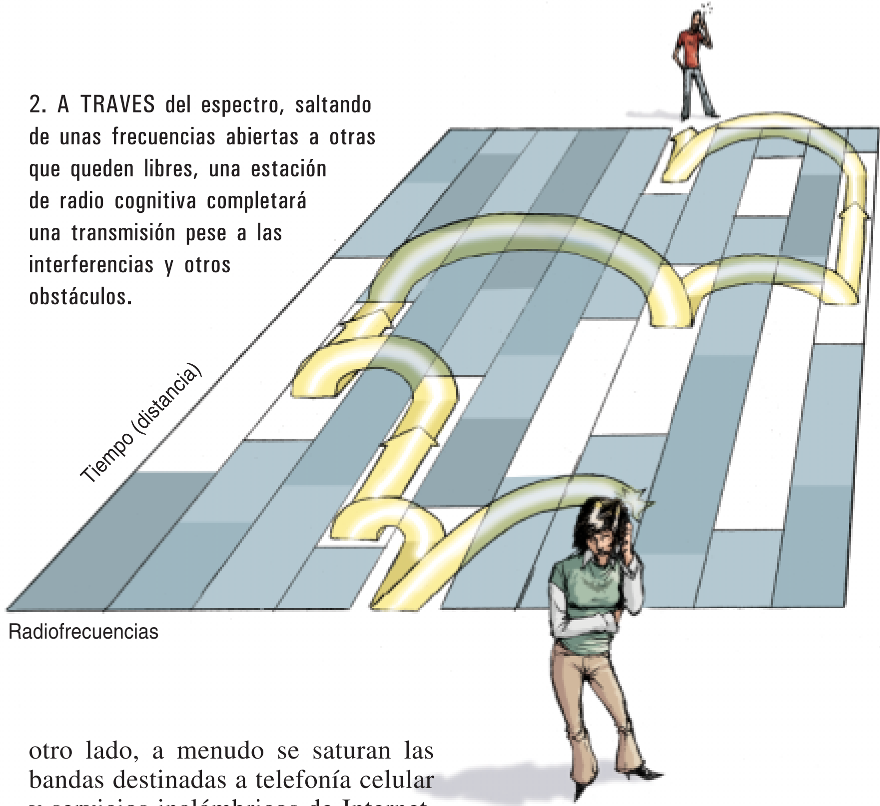
La comercialización final de los sistemas de radio cognitiva podría provocar una caída de costes muy considerable y una gran mejora de la calidad del servicio. El teléfono celular más avanzado que haya hoy a la venta tiene acceso a más de un gigahertz (GHz) útil, pero desaprovechado, del espectro radioeléctrico. En un momento cualquiera, sin embargo, el aparato no emplea más de 10 megahertz (MHz) —la centésima parte del recurso disponible—, seleccionado además sólo entre los más o menos 100 MHz de asignaciones prefijadas de espectro a los que pueden acceder los circuitos telefónicos.

Por añadidura, un teléfono móvil corriente es capaz de procesar cientos de millones de instrucciones por segundo, en gran parte dedicadas a normas exclusivas del servicio celular. El proveedor de servicio remite tales normas para sus propios fines —la depuración de programas, por ejemplo—, sin necesidad de que sean de inmediato provecho para el usuario. Esa capacidad podría utilizarse para remitir con seguridad programas auxiliares que permitan la conexión del teléfono a una red inalámbrica de área local (WLAN) gratuita. No es de extrañar que un alto directivo de Motorola declarase en 2004, en un congreso sobre comunicaciones móviles, que el teléfono basado en redes WLAN, técnicamente viable desde hace años, no es del gusto de los proveedores de servicios celulares: la conexión automática de esos teléfonos a redes WLAN de empresa durante la jornada laboral dejaría a los proveedores de servicio sin percibir ingresos varias horas al día.

Pero el genio ya ha salido de la botella. El uso de técnicas SDR en regiones poco utilizadas del espectro, unido a los programas informáticos para el control autónomo de la radio cognitiva (que juega a favor del usuario), configura una vía comercial que llevará a la adopción de dicha radio.

Abundancia de espectro libre

Aparte de las bandas de alta frecuencia y de microondas por encima de 6 GHz, de todo el espectro radioeléctrico actualmente atribuido —entre los 28 y los 5600 MHz—–, hay unos 2,8 GHz que se encuentran infrautilizados, pero al alcance de la radio cognitiva. (La estimación se basa en la sensibilidad nominal de los receptores y los niveles de ganancia de las antenas existentes.) Por



2. A TRAVES del espectro, saltando de unas frecuencias abiertas a otras que queden libres, una estación de radio cognitiva completará una transmisión pese a las interferencias y otros obstáculos.

otro lado, a menudo se saturan las bandas destinadas a telefonía celular y servicios inalámbricos de Internet. Las utilizan para comunicaciones de datos de corto alcance innumerables artilugios electrónicos, desde los mandos de apertura a distancia de los coches o las puertas de los garajes a los que teledirigen juguetes; cualquier congregación numerosa de usuarios, por ejemplo de aficionados a los aeromodelos teledirigidos, podría engullirse el espectro atribuido. Además, las bandas del servicio celular que a las tres y media de la mañana están desocupadas, sufren una severa congestión en la hora punta de las diez o a la hora de volver a casa por la tarde, sobre todo si el tráfico es intenso.

Por encima de 6 GHz, la humedad y las precipitaciones absorben con avidez las señales de radiofrecuencia; aun en ambiente seco, la absorción es máxima cerca de 20 y de 60 GHz. No obstante, ciertos enlaces de datos de corto alcance transmiten hoy a velocidades del orden del megabit por segundo a frecuencias cercanas a 34 y 70 MHz. Recientemente, dispositivos inalámbricos que operan en esas bandas superiores han podido ofrecer, gracias a una mayor potencia de procesamiento, anchos de banda instantáneos de gigabits por segundo dentro de zonas de cobertura muy restringidas ("picocélulas"). Esta técnica podría ser útil para la comunicación de usuarios móviles entre vehículos que circulen por carretera, entre peatones o en sistemas inalámbricos fijos en el interior de edificios.

Jens Zander, una autoridad en sistemas radioeléctricos del Instituto Real de Tecnología en Estocolmo, sostiene que no hay escasez alguna de espectro, sino carencia de una estructura de comunicaciones asequible. Las torres de telefonía celular, las interconexiones a la red telefónica pública de conmutación, los sistemas de tarificación son los puntales —esenciales y costosos— que sustentan el uso alquilado del espectro. Desde los años noventa, mientras los teléfonos celulares se achicaban, primero desde tamaño de un ladrillo hasta el de un Motorola StarTac y luego hasta el de los actuales aparatos multifuncionales de estilo "concha", no ha habido más remedio que construir y mantener infraestructuras especializadas. A principios de 2005, sin embargo, un fabricante, Vanu, hizo una demostración de la primera estación base del sistema global de comunicaciones móviles (GSM) con SDR. La estación va equipada con un conversor de RF que hace procesable la señal de radio por medio de un dispositivo que, en esencia, es un ordenador portátil de altas prestaciones sin teclado ni pantalla. Sólo cinco años antes, la unidad GSM de transcodificador y adaptador de velocidad necesitaba un estante de servidores y consumía kilowatt de potencia operativa. En ese período, los progresos en semiconductores redujeron el coste de la estación base de una célula pequeña, de tal modo que ahora puede residir en un ordenador portátil o de sobremesa.

Cambios en la transmisión

La continua revolución microelectrónica e informática ha alterado, pues, los límites fundamentales de los equipos de radio durante los últimos diez años y rebajado el coste de los sistemas de infraestructura celular hasta menos del 1 por ciento de su valor anterior. Ahora es cuando empieza a notarse el efecto de estas transformaciones en la técnica inalámbrica avanzada y en sus mercados.

En los años anteriores, la televisión analógica (con soporte físico especializado y ancho de banda de 6 MHz) era la mayor consumidora de espectro radioeléctrico. En la actualidad, la TV digital de alta definición transporta en la misma banda de 6 MHz el equivalente a velocidades de transmisión de casi 100 megabit por segundo. Un portátil con procesador Intel Pentium puede generar hoy imágenes y sonidos utilizando programas y una versión digitalizada de la señal de TV analógica procedente de un conversor de RF. Este conversor cambia la frecuencia portadora de la señal de radio desde la radiofrecuencia en la antena a una frecuencia intermedia que un chip conversor analógico-digital transforma en un formato apto para el procesamiento por los programas. Mediante tales chips se pueden explotar simultáneamente cientos de megahertz del espectro de RF. Algunos de estos conversores están excitados por circuitos de sistemas microelectromecánicos (MEMS) —semiconductores provistos de dispositivos mecánicos a escala micrométrica—, como los condensadores de RF analógicos reconfigurables digitalmente. Producidas en gran cantidad, las tarjetas de periféricos RF basadas en MEMS pueden acceder a decenas de megahertz del espectro en cualquier región entre 30 y 5600 MHz, por un precio similar al del teléfono móvil actual.

La penetración en el mercado de los dispositivos RF con MEMS ha sido lenta porque cuestan más que los equipos con chips de radiofrecuencia fija, de menor capacidad.

MATT VINCENT

EL ESPECTRO DE RADIOFRECUENCIAS

Los organismos oficiales atribuyen bandas del espectro radioeléctrico a una gran diversidad de usuarios y aplicaciones; a cada uno le asigna una banda específica ubicada entre las frecuencias de nueve kilohertz (9000 ciclos por segundo) y 300 gigahertz. Se representa aquí, simplificado, el espectro de radiofrecuencias y su asignación en EE.UU.

SERVICIOS RADIOELECTRICOS

Móvil aeronáutico
Móvil aeronáutico por satélite
Radionavegación aeronáutica
Radioaficionados
Radioaficionados por satélite
Radio- y teledifusión
Radio- y teledifusión por satélite
Exploración terrestre por satélite

Entre puntos fijos
Entre puntos fijos por satélite
Intersatélite
Móvil terrestre
Móvil terrestre por satélite
Móvil marítimo
Móvil marítimo por satélite
Radionavegación marítima

Ayuda meteorológica
Meteorológico por satélite
Móvil
Móvil por satélite
Radioastronomía
Radiodeterminación por satélite
Radionavegación
Radionavegación por satélite

Radionavegación
Radionavegación por satélite
Operaciones espaciales
Investigación espacial
Patrón de frecuencia y señal horaria
Patrón de frecuencia y señal horaria por satélite
Exclusivo para servicios oficiales
Exclusivo para servicios no oficiales

3 kilohertz — 9 kHz — 300 kHz

No atribuido

300 kHz — 3 megahertz

3 MHz — 30 MHz

30 MHz — 300 MHz

300 MHz — 3 gigahertz

3 GHz — 30 GHz

30 GHz — 300 GHz

FUENTE: DEPARTAMENTO DE COMERCIO DE EE.UU.

Sin embargo, una resolución de la Comisión Federal de Comunicaciones estadounidense de 2004, que favorecía el desarrollo de la radio cognitiva, ofrecía nuevos incentivos para la fabricación de productos RF MEMS. La agencia recomendaba que en las redes *ad hoc* de baja potencia se recurriera a la radio cognitiva, dentro de bandas de TV sin utilizar. Con ello quedaron libres más de 100 MHz para el uso de radio cognitiva en mercados por lo usual urbanos. La aparición de los dispositivos RF MEMS y el respaldo de la Comisión Federal se conjugan para que pueda resultar más común en los tiempos venideros que se comparta el espectro. Uno o dos canales analógicos RF MEMS que operen en las bandas baja y media del espectro de radio crearían redes *ad hoc* de corto alcance en cualquier banda donde usuarios autorizados acuerden alquilar, compartir o intercambiar segmentos del espectro.

Es, por tanto, posible que una tarjeta de radio cognitiva RF MEMS convierta un teléfono celular en una WLAN, un ordenador portátil en un teléfono celular o un teléfono inalámbrico en "torre" de picocélula. A partir de tal picocélula, un ordenador doméstico equipado con un sistema de radiocontrol cognitivo podría alquilar tiempo de ocupación a usuarios transeúntes, facturando a través del correspondiente proveedor de Internet la transmisión inalámbrica segura de voz o datos.

Rehacer la Red inalámbrica

En los sistemas de telefonía móvil tradicionales, la inteligencia necesaria para operar eficazmente reside en su mayor parte en la correspondiente red celular. Pese a su capacidad superior de procesamiento, las nuevas técnicas celulares no son mucho más inteligentes que sus antecesoras. Todavía tiene el usuario que contratar con un proveedor de servicio el acceso a la red celular y luego a la red telefónica pública de conmutación de circuitos. Por el contrario, las técnicas de radio cognitiva dotan al teléfono, el ordenador portátil o la agenda personal inalámbrica de la inteligencia precisa para la conexión a redes inalámbricas. Dado que la SDR actúa bajo el gobierno de un subsistema de control cognitivo, una unidad podrá detectar las posibilidades de conformar redes en RF desde cualquier lugar en que se encuentre.

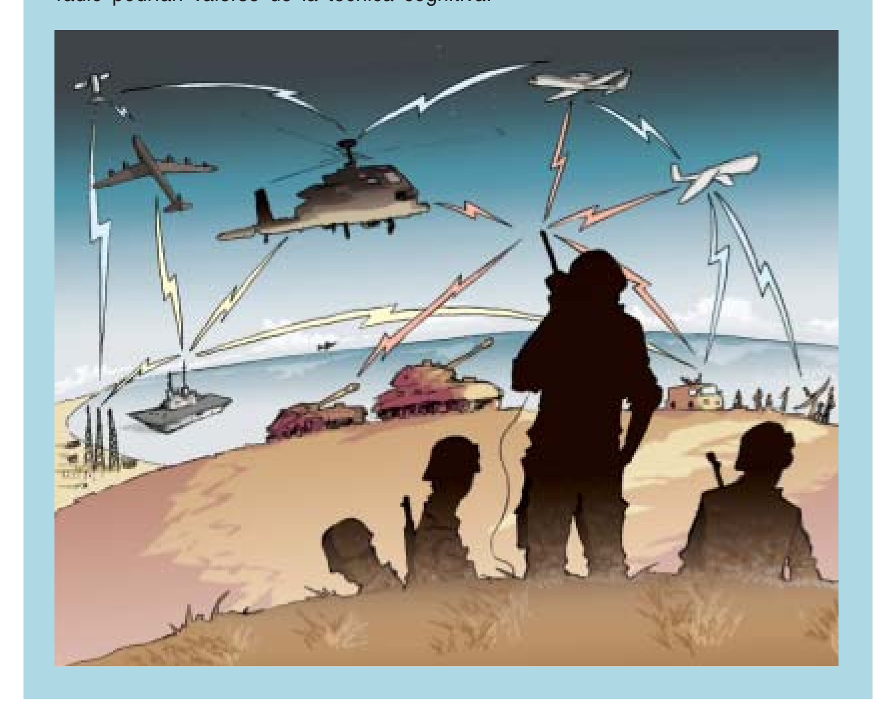
Actualmente, el 90 por ciento de los nuevos ordenadores portátiles tiene capacidad de conectarse a redes WLAN. Proliferan de manera imparable las WLAN domésticas y profesionales, así como los puntos de acceso inalámbricos a Internet. La inteligencia funcional del sistema de radio cognitiva le permitirá alquilar o tomar prestada una WLAN u otra región del espectro de RF durante tiempos muy breves (segundos o minutos) a cambio de "pago en espectro": un compromiso verificable de prestar en el futuro parte de la capacidad de la picocélula propia a otra radio cognitiva. A partir de estos puntos de acceso inalámbrico a la Red, el proveedor de servicios de Internet transferiría luego los datos o la llamada del usuario a cualquier lugar del mundo. Como puede apreciarse, la radio cognitiva no necesita disponer de una red celular especializada para conectar el usuario a otros dispositivos por vías inalámbricas y de Internet. Además, a medida que se expandan las interacciones de la radio cognitiva con la Red inalámbrica, habrá menor necesidad de establecer un contrato a largo plazo con un proveedor de servicios celulares.

Conocimiento del espacio radioeléctrico

Cuando un usuario común utiliza una red inalámbrica con dispositivos electrónicos corrientes, el sistema se esfuerza por consumir la mayor cantidad de espectro, un recurso escaso, al tiempo que interfiere con las estaciones de radio próximas. La radio cognitiva tendrá, en cambio, inteligencia suficiente para introducir rutinas de gestión, transacciones razonables, en las operaciones del

TODOS LOS ENLACES DE COMUNICACION A LA VEZ

La radio cognitiva podría garantizar comunicaciones rápidas y seguras en el campo de batalla, clave de la victoria en una guerra moderna. Aunque los diferentes cuerpos y armamentos emplean hoy sistemas de radio que pueden ser incompatibles, las técnicas de radio inteligente de la próxima generación servirían para que los jefes militares permaneciesen informados de la situación más reciente, dentro y fuera de la zona de combate, mediante enlaces de voz, datos y vídeo en tiempo real que les conectarían con todas las fuerzas amigas pese a las interferencias del conflicto bélico. Los futuros equipos militares de radio podrían valerse de la técnica cognitiva.



MATT VINCENT

espectro de RF. Detectará además las picocélulas cercanas e interactuará con ellas para mantener la conexión del usuario de radio cognitiva por los medios que mejor se acomoden a sus necesidades, variables según el momento y la situación.

Para realizar estas tareas, la unidad de radio cognitiva tiene, en primer lugar, que “saber” cómo varía la potencia de RF radiada desde su emplazamiento en función de la distancia por tierra, entre obstáculos y por el aire. Los teléfonos celulares no necesitan esta información porque la red fija emplea espectro radioeléctrico especialmente asignado que ha sido calibrado previamente para los diagramas de radiación existentes. Las estaciones cognitivas, en cambio, exploran todo el entorno local de RF en bandas baja, media y alta, cartografiando sus características en función del espacio, del tiempo y de la propagación de frecuencias. El desarrollo de una radio cognitiva con exploración del espectro exigirá el diseño de sensores de alta calidad y algoritmos prácticos para que los nodos de comunicaciones cooperantes intercambien datos relativos a la observación continua del espectro. Los sistemas que ofrecen capacidades de entrada y salida múltiples dirigirán las transmisiones a través de componentes complejos que multipliquen los trayectos, para tener en cuenta las reflexiones de la señal en edificios o vehículos, y lejos de otras radios que puedan causar interferencia.

Un sistema de radio cognitiva plenamente operativo tendrá la inteligencia suficiente para reconocer la “situación” local de las radiofrecuencias, elegir la banda, modo y servicio de radio que necesite, así como las conexiones, mediante remites SDR, con la banda y en el modo que se haya escogido. A continuación, dirigirá su energía de transmisión hacia el receptor deseado, reduciendo al mínimo la posible interferencia con otras estaciones de radio, incluso las cognitivas. De este modo, gestionará el espectro con los mejores “modales” y conectará al usuario garantizando seguridad y privacidad.

Podría mejorarse la precisión de tales operaciones mediante el desarrollo de representaciones informáticas tridimensionales del paisaje urbano entero, que se almacenarían en discos duros de gigabytes y se consultarían por vía inalámbrica en caso de necesidad. A partir de tales modelos se efectuarían unas predicciones de intensidad de la señal recibida que permitirían a las radios cognitivas evitar la mayoría de las interferencias. Una vez normalizados los canales de radiodifusión por los que podrían “quejarse” las radios cognitivas sin perturbar a otras estaciones, se habría completado el ciclo de la “buena conducta” de radio.

Este ideal de unas “reglas de etiqueta” de la radio cognitiva se complica por la variación en el tiempo de la interferencia compuesta que produce el entorno, en la que se incluyen las creadas por el ruido eléctrico natural (las tormentas), los generadores de energía eléctrica, los sistemas de ignición de automóviles y los transmisores de radio. Los efectos de todas estas fuentes de RF cambian de un momento a otro. De noche, por ejemplo, funcionan pocos ascensores, por lo que el nivel de ruido radioeléctrico generado en sus motores es muy escaso, pero en las horas de actividad ese nivel crece notablemente. La potencia de ruido total tiende a ser máxima en los centros urbanos entre las 10 y las 11 de la mañana, y es menor en los núcleos rurales y por la noche. Aunque la complejidad estadística de tales fuentes combinadas dificulte cualquier predicción, la radio cognitiva memorizará los patrones correspondientes a ubicaciones importantes (como el lugar de trabajo y el domicilio) para usuarios conocidos.

El futuro de la radio inteligente

Confirmados los cambiantes patrones de energía en cada banda, los dispositivos de radio cognitiva podrán utilizar la Red semántica para intercambiar libremente esa información con otros [*véase* “La Red semántica”, de Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2001]. Esto ayudará a optimizar la búsqueda de espectro rentable y poco utilizado. Las radios cognitivas evitarán así perturbar a otros usuarios sin dejar de transmitir potencia suficiente para superar interferencias ambientales y cooperar de forma creativa.

Las decisiones acerca del futuro de la técnica radioeléctrica cognitiva configuran una batalla entre dos sectores gigantes: el de la telefonía móvil y el de las telecomunicaciones, por una parte, y el de Internet por otra, que comprende a Microsoft, Intel, Google, los proveedores de servicios de Internet y los fabricantes de electrónica de consumo. Aunque se opongan intereses arraigados, parece verosímil el progreso hacia la radio cognitiva, puesto que podría evitar el relativo caos y falta de flexibilidad de las bandas radioeléctricas no reglamentadas, como las que ahora atienden a dispositivos científicos y médicos y otros instrumentos. En último término, las rutinas inteligentes para compartir sin interferencias el espectro, basadas en técnicas de radio cognitiva, convertirán los gigahertz de espectro no utilizados en posibles conexiones de banda ancha para multitud de usuarios.

Si la reglamentación de la Comisión Federal de Comunicaciones sigue por el camino actual, quedarán disponibles para ser compartidas enormes franjas del espectro, con cientos de megahertz de anchura. La proverbial escasez de espectro radioeléctrico puede mañana convertirse en copiosa abundancia de frecuencias disponibles. En vez de tardar un minuto en cargar una imagen comprimida con un tamaño de unos megapíxeles, un teléfono celular podría atender 10 de estas imágenes en un segundo.

La radio cognitiva provocará en el ámbito social y comercial cambios de magnitud semejante a los creados por la telefonía móvil; ocurrirá en cuanto unos dispositivos avanzados aprovechen la Red inalámbrica para desplazar a los teléfonos celulares. Tardará cierto tiempo en desarrollarse la radio cognitiva, pero será notable su impacto en nuestro modo de vivir.

Bibliografía complementaria

COGNITIVE RADIO SHOWS GREAT PROMISE. Bruce Fette en *COTS Journal*; octubre de 2004.

COGNITIVE RADIO ARCHITECTURE. Joseph Mitola III. John Wiley & Sons, abril de 2006.

Hacia el rozamiento cero

Dos superficies cristalinas pueden deslizarse una sobre otra sin fricción apenas. El descubrimiento de este fenómeno inesperado abre perspectivas de interés, sobre todo para la lubrificación de motores

Jean Michel Martin

Las normas para frenar la contaminación son cada vez más draconianas. En EE.UU., a partir de 2007, los vehículos no podrán arrojar a la atmósfera más de 0,2 gramos de óxidos de azufre por kilowatt hora de energía consumida, lo que significa que las emisiones habrán de ser unas cinco veces menores que las actuales. Las futuras normas europeas (*Euro V* en 2008) no son menos severas. Plantean un gran desafío para la industria automovilística: las campanas van a doblar a muerto por los aditivos fosforados o sulfurados hoy presentes en todos los aceites lubrificantes de motores térmicos. Dichas moléculas orgánicas mejoran el poder lubrificante y antidesgaste de los aceites, pero presentan un inconveniente doble: por un lado, participan en reacciones de combustión que liberan a la atmósfera subproductos tóxicos; por otro, contaminan los catalizadores de los colectores de escape, aumentando así la emisión de óxidos de azufre.

¿Cómo podrá la industria afrontar el reto? Los estudios consagrados a los fenómenos de rozamiento y lubrificación se han multiplicado desde hace varios años. Están dando fruto: la obtención de rozamientos muy débiles entre dos sólidos, sin lubrificación líquida, es hoy una realidad. En el último decenio del siglo XX, los físicos descubrieron el fenómeno de la suprafricción: el rozamiento desaparecía casi del todo en el caso de ciertas superficies cristalinas que se deslizaban una sobre otra en un vacío casi absoluto. Describiré aquí este fenómeno y su origen. Expondré luego trabajos que guardan relación con la suprafricción: investigaciones sobre la lubrificación mediante láminas delgadas o sobre los aditivos de los aceites.

El rozamiento entre dos superficies se traduce en una fuerza de resistencia al movimiento que implica, sobre todo, pérdidas de energía, calentamiento y desgaste. Su impacto económico es considerable: casi la mitad de la energía producida en el mundo se consume en vencer el rozamiento en las máquinas y el desgaste correspondiente. En 2004, un estudio del Departamento de Energía evaluó en 500.000 millones de dólares las pérdidas anuales, sólo en EE.UU.

Según los ingenieros de Nissan Motors, la disminución de unas pocas centésimas en el rozamiento de las piezas que sufren máxima solicitación en un motor térmico reduciría el consumo de carburante en torno a un 5 por ciento. Extrapolado al conjunto del parque automovilístico mundial, ello supondría un ahorro de unos 30.000 millones de litros de carburante al año (o, si se quiere, un monto anual de unos 10.000 millones de euros).

Pero las ventajas no se miden sólo en términos de carburante o costes económicos. El rozamiento es fuente de vibraciones. Por tanto, la reducción del rozamiento disminuiría las vibraciones, así como el ruido que éstas generan. Por otra parte, tal reducción contribuiría al desarrollo de dispositivos mecánicos miniaturizados. Cuanto menor es el tamaño de una máquina, mayor es la razón entre superficie y volumen. A la escala de micrómetros o nanómetros, la importancia relativa de los rozamientos es, por tanto, mucho mayor que a escala macroscópica. También los ordenadores se beneficiarían de una reducción del rozamiento. El cabezal de lectura de un disco duro vuela sobre éste a muy poca altura. Para aumentar la velocidad de transferencia de información, la distancia entre la cabeza lecto-escritora y el disco quedará pronto reducida a unos pocos nanómetros, pero con ello aumentará el riesgo de contacto, vale decir, de rozamiento y desgaste. Las aplicaciones llegarían, asimismo, al campo de la medicina; en concreto, a la fabricación de prótesis (rodilla, cadera, etcétera) en las que el rozamiento degrada el correcto funcionamiento de las articulaciones. El cartílago produce de forma natural una fricción ultradébil, pero no conocemos todavía el mecanismo. ¿Encontraremos los materiales y el lubrificante adecuados para lograr rendimientos tribológicos (del griego *tribein*, frotar) semejantes? La reducción del rozamiento hasta el "deslizamiento sin fricción" constituye, pues, un sueño.

¿Cómo se mide el rozamiento? Pensemos en un cubo depositado sobre una mesa. Los dos cuerpos ejercen, uno contra el otro, sendas fuerzas perpendiculares a la superficie de contacto, de intensidad igual al peso del cubo. Si arrastramos el cubo sobre la mesa aparece una fuerza que se opone al movimiento: una fuerza tangencial a la superficie de contacto y de sentido contrario al del desplazamiento. El coeficiente de rozamiento corresponde, por definición, al cociente de dividir la fuerza tangencial (la de rozamiento) entre la fuerza perpendicular que asegura el contacto (en nuestro ejemplo, el peso del



1. "QUIEN ESTA ESPADA ARRANQUE SERA REY", profetizaba la leyenda artúrica. La espada se hallaba clavada en un yunque. Arturo, que sólo era el hijo de un caballero, extrajo sin esfuerzo a Excálibur del yunque, para gran daño de los barones que pretendían el título. ¿Poseía Arturo el secreto de la suprafricción?

cubo). La fuerza de rozamiento será tanto mayor cuanto mayor sea este coeficiente, que, en general, depende sólo de la composición química y el estado físico de las superficies en contacto, y no de la fuerza perpendicular que se ejerza o del área aparente de contacto.

Cabe distinguir entre el coeficiente de rozamiento estático, que se define a partir de la fuerza tangencial mínima para poner en movimiento relativo los dos cuerpos en contacto, y el coeficiente de rozamiento dinámico, que depende de la fuerza de rozamiento experimentada durante el deslizamiento relativo. Fue Leonardo da Vinci, en el siglo XV, el primero en medir el rozamiento estático; así lo demuestran manuscritos suyos recuperados en Madrid en 1967. Aquel artista y sabio se sirvió de un plano inclinado (el objeto depositado sobre el plano se pone en movimiento a partir de cierto grado de inclinación) o de un peso que tiraba, por medio de una polea, de un objeto depositado sobre un plano horizontal.

A Guillaume Amontons debemos el primer tribómetro. Este físico francés se valía, ya en 1699, de un resorte para medir la fuerza de rozamiento. En su dispositivo, un fleje ejercía una carga vertical sobre el cuerpo en deslizamiento horizontal y se tiraba en sentido horizontal de un resorte fijado al cuerpo. La fuerza de rozamiento se medía a partir de la elongación del resorte, que se leía sobre una regla graduada. Los tribómetros modernos se fundan en el mismo principio, si bien recurren a técnicas más refinadas: las fuerzas se aplican o se miden por medio de flejes elásticos o de captadores piezoeléctricos; los desplazamientos se miden con instrumentos ópticos de precisión.

Los coeficientes de rozamiento superan el valor 1 sólo en raras ocasiones. El límite superior depende de la cohesión del material: si la fuerza de rozamiento es mayor que las fuerzas de cohesión interna del material, éste se deforma.

Rozamientos ultradébiles: mediciones delicadas

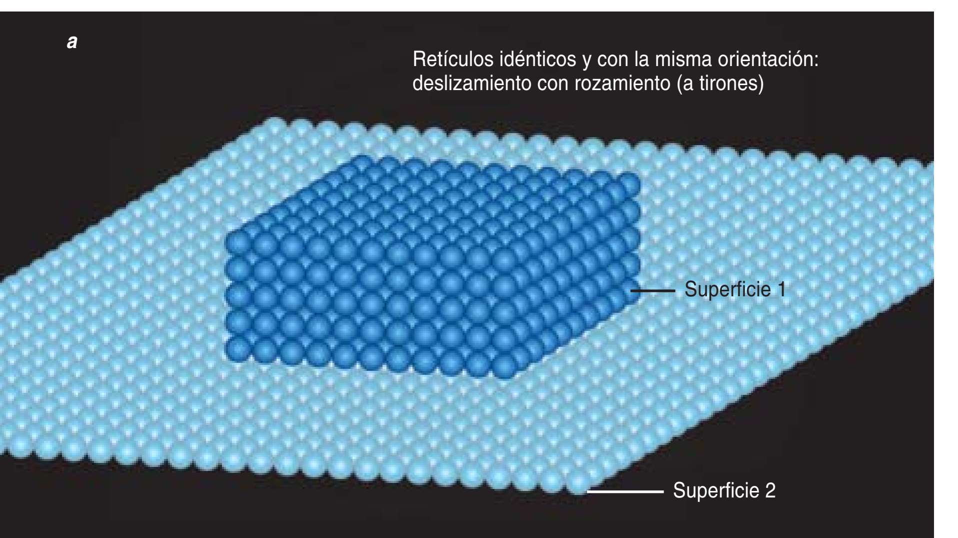
La medición de coeficientes de rozamiento muy pequeños, menores que una milésima, entraña una gran dificultad técnica. Por una parte, resulta difícil garantizar que la fuerza externa —la carga ejercida— sea exactamente perpendicular a la superficie de contacto. La más mínima inclinación con respecto a la perpendicular induce la aparición de una componente tangencial que perturba la medida de la fuerza de rozamiento, también tangencial; cuanto menor sea el rozamiento, más falseada resultará la medida. Por otra parte, todo dispositivo mecánico que cuente con piezas en movimiento se halla sometido a vibraciones, que también perturban la medida.

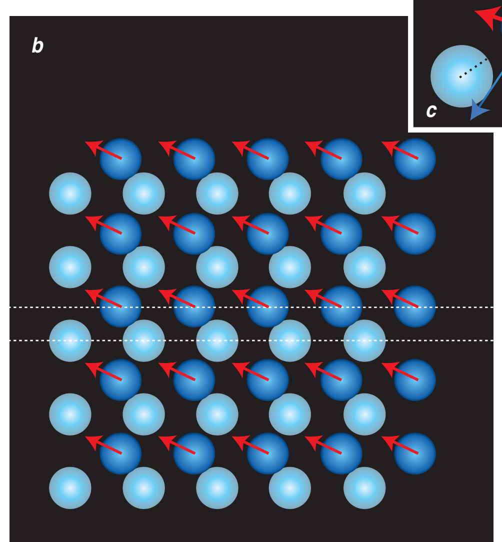
El coeficiente de rozamiento raramente es inferior a una centésima, salvo en ciertas situaciones en las que se conjugan una presión de contacto débil, una velocidad de deslizamiento elevada y la presencia de un lubrificante viscoso. Se habla de fricción ultradébil cuando el coeficiente de rozamiento es inferior a 0,05. El descubrimiento de la suprafricción, es decir, de rozamientos tan pequeños que escapan a los límites de lo actualmente mensurable, ha sido de lo más espectacular.

Jeffrey Sokoloff, de la Universidad Noroccidental, previó la suprafricción, o superlubrificación (en inglés "superlubricity"), hacia 1990. Su equipo estudiaba las causas del rozamiento a escala atómica valiéndose de un modelo simplificado, el modelo de Tomlinson, en el que los átomos se consideran esferas diminutas y las fuerzas interatómicas se representan mediante pequeños resortes. Más tarde, Motohisa Hirano y Kazumasa Shinjo, entonces en la compañía nipona de telecomunicaciones NTT, describieron el efecto con mayor detalle.

Predicción teórica de la suprafricción

Según Hirano y Shinjo, en ciertas condiciones, durante el deslizamiento de dos superficies cristalinas en contacto,





2. SI LOS RETICULOS CRISTALINOS de las dos superficies en contacto (*1* y *2*) son idénticas y están orientadas de igual modo (*a*), todos los átomos de la superficie *1* tienen la misma disposición con respecto a los átomos del soporte *2*, y esto, en todo momento (*b, vista en planta*). En el transcurso de un deslizamiento, cada uno de los átomos de la superficie *1* es repelido por los átomos de la superficie *2* con la misma fuerza, intensidad y dirección, que todos los demás (las flechas rojas representan sólo la componente horizontal de estas fuerzas; se indica en *c* la resultante simplificada de las fuerzas que actúan sobre un átomo individual, siendo la repulsión entre dos átomos tanto más intensa cuanto menor sea la distancia que los sepa-

el rozamiento es despreciable. Una primera condición: que las superficies se encuentren químicamente limpias y libres de gases adsorbidos. Una segunda condición, ésta crucial, es la inconmensurabilidad de las redes atómicas de las dos superficies en mutuo deslizamiento, es decir, la no coincidencia de la casi totalidad de los emplazamientos atómicos de una red sobre los de la otra. Para comprender de forma intuitiva lo que esto significa, imaginemos que se hacen deslizar, uno sobre otro, dos envases alveolados. Unas hueveras, por ejemplo. Si estas dos superficies de relieve periódico se orientan de la misma forma, tienden a encastrarse y resulta difícil desplazarlas sin brusquedades. Si se gira una con respecto a la otra, en cambio, la periodicidad de las estructuras deja de coincidir; resulta imposible encastrarlas y, por tanto, se deslizan con mayor suavidad.

Esta es, en esencia, la idea que subyace tras los cálculos y las simulaciones teóricas de Hirano y Shinjo. La superficie alveolada de una huevera ofrece la imagen de una superficie cristalina limpia, en la que los átomos forman una red periódica. Cuando los dos retículos cristalinos en contacto se hallan "en fase" —son conmensurables— resulta difícil desplazar una de las superficies con respecto a la otra, porque todos los átomos de las dos superficies se repelen (o se atraen) al mismo tiempo. Cuando las superficies son inconmensurables, en cambio, se produce una compensación: unos átomos se repelen, mientras que otros se atraen; la resultante global es entonces nula y, por ende, no existe rozamiento.

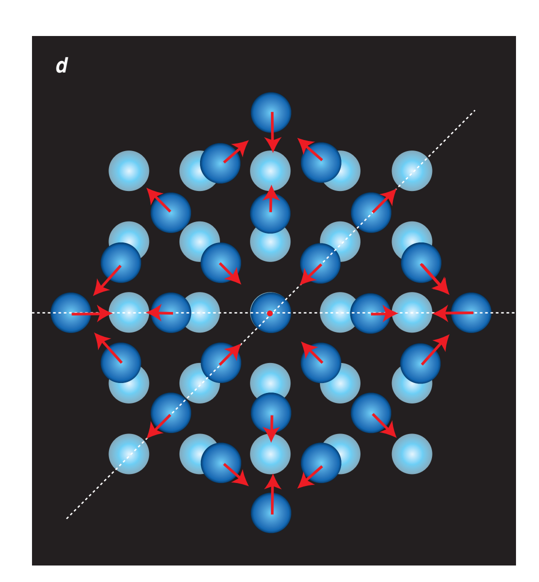
En el caso de las superficies de cristales de retículo cúbico la situación más favorable se da cuando éstas se hallan giradas 45 grados una con respecto a la otra. En un retículo hexagonal, el ángulo óptimo es de 30 grados. La inconmensurabilidad se logra también con dos superficies de materiales distintos, cuyos retículos cristalinos sean, ya de partida, muy diferentes.

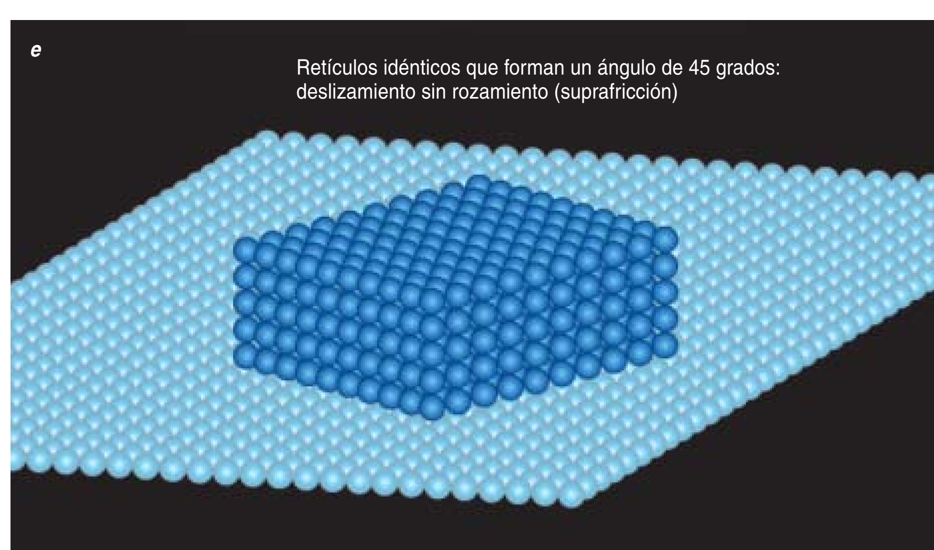
El régimen de suprafricción exige una tercera condición importante; a saber, una gran flexibilidad de los enlaces interatómicos presentes en la superficie. Si estos enlaces son flexibles, los átomos más expuestos de cada superficie tienen la posibilidad de desplazarse hacia los lados, por efecto de las fuerzas de contacto. Durante el deslizamiento, los átomos que entran en contacto pueden entonces contornearse mejor, desplazándose de forma elástica a modo de resortes, e impedir así la disipación de energía que produce el rozamiento.

Tal es el principio que subyace bajo la suprafricción. Pero, ¿ha llegado a observarse este fenómeno? Hirano y Shinjo se esforzaron, desde un primer momento, en verificar sus predicciones. Los resultados iniciales, obtenidos con superficies de mica, no fueron concluyentes (las superficies no estaban libres de moléculas adsorbidas). Con todo, pusieron de manifiesto una variación —modesta, de un factor del orden de cuatro— de la fuerza de rozamiento, en función de la orientación relativa de las dos superficies.

El grupo de Hirano obtuvo resultados más sólidos en 1997. Valiéndose de la punta de tungsteno de un microscopio de efecto túnel que operaba en un vacío casi absoluto, midieron la fricción entre esa punta y una superficie de silicio. Constataron una disminución importante —de hasta unas 25 veces menor— de la fuerza de rozamiento, dependiente de la orientación relativa de los retículos cristalinos del tungsteno y del silicio. Lo consideraron una manifestación de la suprafricción.

Sin embargo, las pruebas claras y convincentes de suprafricción no llegaron hasta 2004, a través de los experimentos realizados por el grupo que dirige Martin Dienwiebeld, de la Universidad de Leiden. Concibieron un nanotribómetro original: una suerte de microscopio de fuerzas atómicas en el que una punta de tungsteno mide las fuerzas ejercidas sobre ella en las tres direc-





ra.) La resultante de todas estas fuerzas atómicas es una fuerza de rozamiento no nula. Si los dos retículos idénticos forman un cierto ángulo (*d* y *e*), las fuerzas que experimentan los átomos cambian de unos a otros. En determinados ángulos —45 grados en el caso de un retículo cúbico— se tiene inconmensurabilidad: en cada instante del deslizamiento, las posiciones atómicas de las dos superficies no coinciden jamás en su totalidad, ni siquiera tras una traslación. La irregularidad de las disposiciones relativas es tal, que la suma de las fuerzas experimentadas por los átomos de la superficie superior es nula. En otras palabras, a escala macroscópica, la fuerza de rozamiento desaparece: se produce la suprafricción.

ciones espaciales, con una resolución que puede llegar a los 15 piconewton (1 piconewton = 10^{-12} newton) para las fuerzas laterales. Haciendo deslizar esta punta en diversas direcciones sobre una superficie de grafito, determinaron que la fuerza de rozamiento es máxima (del orden de 250 piconewton) para orientaciones de la superficie que se diferencian en 60 grados, y que alcanza el mínimo mensurable (una quincena de piconewton) para las orientaciones intermedias.

Según parece, una escama de grafito, de unos 100 átomos de carbono, quedó adherida a la punta de tungsteno. En otras palabras: el deslizamiento-rozamiento se produjo entre dos laminillas de grafito. Ahora bien, el retículo cristalino del grafito es hexagonal. Ello explica la periodicidad de 60 grados observada para los máximos de rozamiento; para los ángulos intermedios, en cambio, se produce una inconmensurabilidad, o casi, de los dos retículos cristalinos y, por ende, el efecto de suprafricción.

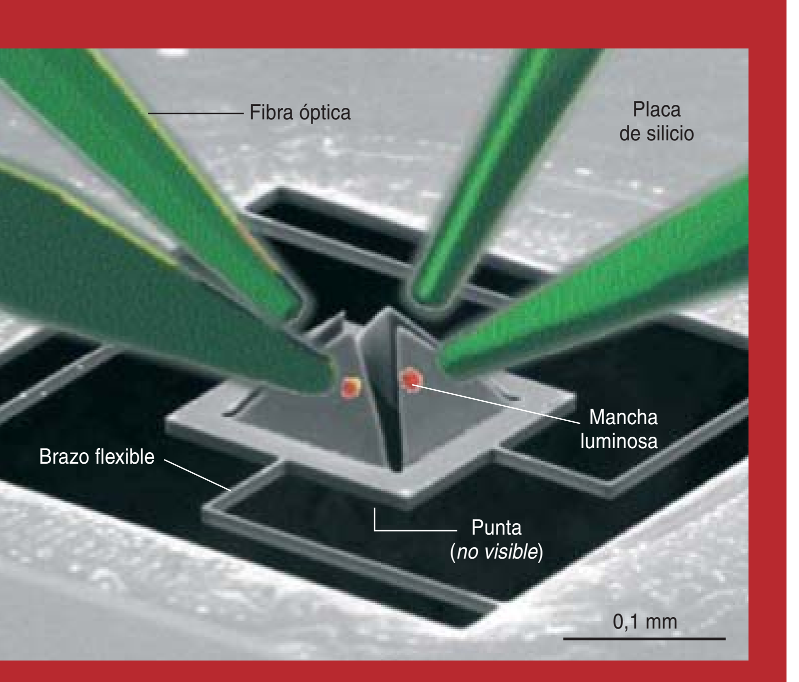
Es necesario ahondar en estos descubrimientos de física fundamental, pues, con toda probabilidad, generarán multitud de aplicaciones. La suprafricción interviene ya en trabajos consagrados a la lubrificación seca, es decir, la lubrificación por medio de revestimientos sólidos. Son muchos los expertos en todo el mundo que estudian el rozamiento de capas delgadas en el vacío extremo, con la mirada puesta, sobre todo, en las aplicaciones espaciales. Estas investigaciones requieren aparatos capaces de medir coeficientes de rozamiento sumamente pequeños (del orden de algunas milésimas) en condiciones de ultravacío (presiones del orden de 10^{-8} pascal, o inferiores). En nuestro propio laboratorio hemos puesto a punto un equipo que integra instrumentos de análisis *in situ* (microscopía electrónica, espectroscopía, etcétera) de las superficies en rozamiento, así como un aparato de deposición de películas finas.

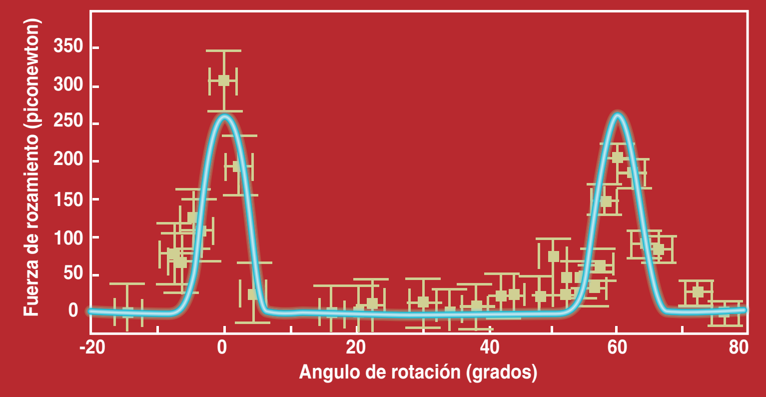
Lubrificación mediante películas sólidas

Mediante este aparato descubrimos, en 1993, la influencia de la suprafricción en el rozamiento entre películas delgadas de bisulfuro de molibdeno (MoS_2) en alto vacío. Este material constituye un lubrificante sólido bien conocido. Presenta una estructura laminar, como el grafito. Diversos estudios de la NASA y de la Corporación Aerospacial estadounidense habían demostrado que, en el vacío, los revestimientos de bisulfuro de molibdeno reducían el coeficiente de rozamiento a valores de algunas centésimas (valor típico: 0,05). Sin embargo, estas películas quedan a menudo contaminadas por oxígeno o carbono.

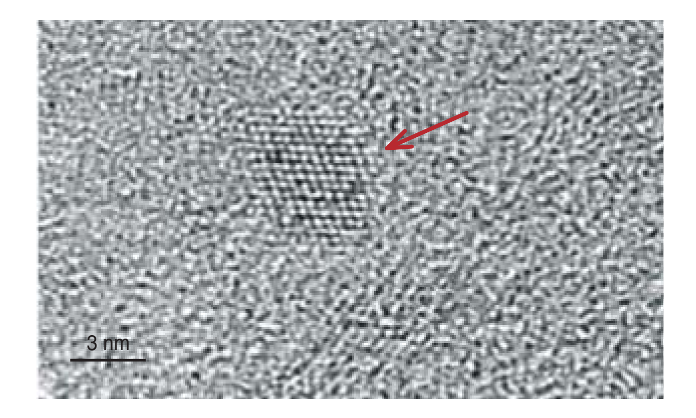
Nuestro aparato permite depositar sobre un soporte plano de silicio y en ultravacío películas de bisulfuro de molibdeno químicamente puras. Al medir el rozamiento entre una pequeña semiesfera de acero (tomada de un rodamiento de bolas) y la capa de bisulfuro de molibdeno, observamos con sorpresa una reducción notable del coeficiente de rozamiento, hallándose el valor alcanzado cercano a los límites mensurables con equipos de este tipo: 2 milésimas.

Los análisis de superficies han demostrado que, en realidad, el rozamiento no se produce entre el acero y el bisulfuro de molibdeno, sino entre dos películas de bisulfuro de molibdeno. Resulta que del MoS_2 se desprenden lamelas que vienen a adherirse a la punta hemisférica. Los análisis cristalográficos, por difracción de rayos X rasantes, así como mediante microscopía electrónica de gran resolución, han revelado que estas lamelas experimentan una doble orientación: una orientación inicial de los planos cristalográficos paralela a la dirección del deslizamiento, seguida por una rotación de unas lamelas con respecto a otras que conduce a una inconmensurabilidad de las dos redes cristalinas en contacto. Es decir, las lamelas de bisulfuro de molibdeno en contacto se orientan según planos paralelos, pero de





3. EN EL DISPOSITIVO DE MEDICION de rozamientos ultradébiles diseñado en la Universidad de Leiden, se ha pegado una punta por debajo de una microestructura de silicio. Esta microestructura comporta un conjunto piramidal de cuatro caras triangulares, unido mediante cuatro brazos a un marco plano de silicio. La punta, fijada bajo la estructura piramidal, experimenta una fuerza de rozamiento cuando se desplaza sobre una superficie. En virtud de esa fuerza horizontal, la pirámide y sus brazos pivotan ligeramente con respecto al marco; esta deformación se mide por interferometría merced a cuatro fibras ópticas. Mediante esta técnica, el equipo de Leiden ha puesto de manifiesto la suprafricción entre dos superficies de grafito. La fuerza de rozamiento es máxima cuando el ángulo que forman los retículos cristalinos es de 60 grados.



forma inconmensurable, creando un caso de suprafricción como el descrito por Hirano y Shinjo.

Diversos trabajos han demostrado efectos similares con otros materiales. Minoru Goto, de la empresa japonesa *Hino Motors*, ha observado la suprafricción de superficies de silicio revestidas de nanocristales de plata. Yaunsheng Jin, de la Universidad de Tsinghua en Pekín, obtuvo en 2004 un rozamiento extraordinariamente débil con superficies de acero revestidas de cementita (Fe_3C) y de magnetita (Fe_3O_4), superficies sin duda inconmensurables en su dominio cristalográfico. En fecha reciente, Masanori Iwaki, de la Agencia Espacial Japonesa JAXA, ha observado casos de suprafricción a baja temperatura y en ultravacío con películas delgadas de bisulfuro de tungsteno (WS_2).

Los efectos de suprafricción mencionados hasta aquí se pusieron de manifiesto en condiciones de vacío extremo o atmósfera inerte. Las aplicaciones potenciales se limitan, por tanto, a campos específicos, como el espacial o el de las micromáquinas. No obstante, los tribólogos están empezando a encontrar y patentar soluciones (superficies y lubrificantes) para las que los valores del coeficiente de rozamiento se acercan a los de la suprafricción. Además, es de suponer que los mecanismos responsables de la reducción del rozamiento, si bien todavía insuficientemente elucidados, estarán vinculados en ciertos casos a la suprafricción.

Lubrificación por rozamiento

Hallamos un ejemplo en el ditiocarbamato de molibdeno, un aditivo que reduce el rozamiento mediante la generación de bisulfuro de molibdeno. Este aditivo se viene utilizando en Japón y en EE.UU. en las formulaciones avanzadas de lubrificantes para motores. Los esfuerzos de cizalladura entre dos piezas metálicas en deslizamiento mutuo provocan reacciones químicas que desembocan en la formación de bisulfuro de molibdeno. Nuestro equipo demostró en 1999, mediante microscopía electrónica de alta resolución, que el bisulfuro de molibdeno formado consta de diminutas lamelas de espesor monomolecular dispersas en una fase amorfa rica en carbono.

Este tipo de lubrificación a escala molecular, mediante sólidos bidimensionales formados *in situ*, promete. En una primera fase, se han estudiado sistemas de dos o tres aditivos capaces de engendrar, químicamente *in situ*, películas bidimensionales lubrificantes. En 2000, se demostró que la mezcla de borato de calcio y de ditiocarbamato de molibdeno produce de forma simultánea, por efecto del rozamiento, bisulfuro de molibdeno y nitruro de boro (BN) hexagonal, así como grafito, compuestos todos ellos de estructura lamelar y de interés tribológico. No se conocen todavía las cadenas de reacciones químicas que intervienen en el proceso. Otros sistemas de interés son las mezclas de borato de calcio, ditiocarbonato de

4. UN ADITIVO ANTIFRICCION, el ditiocarbamato de molibdeno, reacciona en la zona de contacto entre dos sólidos en movimiento relativo: forma hojitas microscópicas de bisulfuro de molibdeno (MoS_2), de espesor monomolecular (*flecha*). Estas hojillas, de retículo cristalino, se adhieren a las superficies de los sólidos y las lubrifican.

GRUPO DE FISICA DE INTERFACES/UNIVERSIDAD DE LEYDE (*arriba*); JEAN MICHEL MARTIN (*abajo*)/POUR LA SCIENCE

molibdeno y ditiofosfato de zinc (el principal aditivo antidesgaste utilizado en los lubrificantes para motores). Ofrecen varias ventajas: reducen el frotamiento, el desgaste, la oxidación y la corrosión. Se obtienen de este modo coeficientes de rozamiento del orden de 0,05, es decir, rozamientos ultradébiles, aunque todavía separados de la suprafricción por un orden de magnitud.

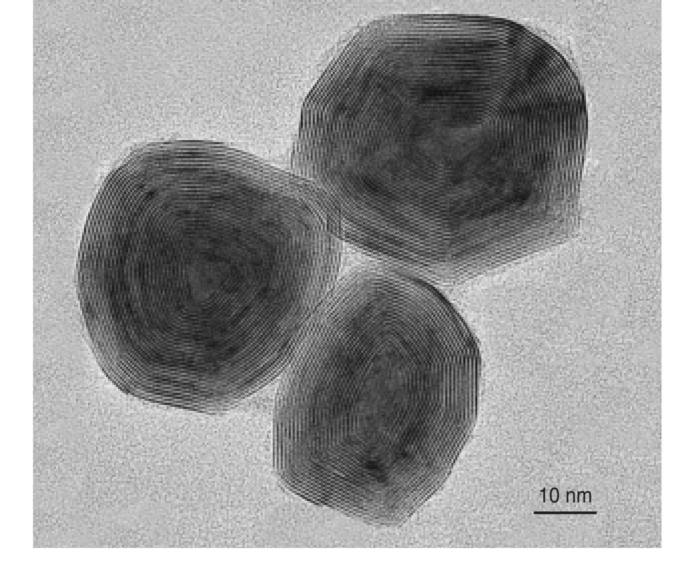
El estudio de estos sistemas pone de relieve la importancia de las reacciones químicas provocadas por el rozamiento. El contacto lubrificado entre dos superficies sólidas constituye una suerte de reactor químico complejo, de tamaño microscópico (un diámetro de 50 micrometros y un espesor del orden de 0,1 micrometro en el caso de una bola de seis milímetros de radio que roza sobre un plano). En una región tal, donde la presión alcanza a menudo el gigapascal (unas 10.000 atmósferas) y la cizalladura es más intensa, las moléculas del lubrificante y otras, procedentes del ambiente gaseoso, reaccionan produciendo compuestos diversos. Entre las dos superficies se forma una película triboquímica: una capa cuyo espesor no supera algunas decenas de nanómetros, que asegura una protección contra el desgaste por medio de mecanismos todavía desconocidos.

Deshojar nanopartículas

Otra vía para alcanzar regímenes de rozamiento despreciable consiste en estudiar el poder lubrificante de partículas nanométricas. En 2004, nuestro equipo comprobó que nanopartículas de bisulfuro de molibdeno (facilitadas por la sociedad israelí *Nanomaterials*) muestran un efecto lubrificante equivalente al de los mejores revestimientos conocidos. El principio de reducción del rozamiento mediante nanopartículas es sencillo: por efecto del rozamiento, las partículas se escinden en hojitas, es decir, liberan *in situ* y en ausencia de aditivos contaminantes las lamelas que, por suprafricción, reducen los rozamientos. La estructura de estas partículas constituidas por capas concéntricas, a modo de catafilos de cebolla, guarda semejanza con la de las nanopartículas de carbono, objetos compuestos de hojillas de grafito encajadas, cuyas propiedades tribológicas resultan igualmente prometedoras, al menos en el campo de la nanotecnia.

Por otra parte, el interés de las estructuras de carbono ha aumentado tras el descubrimiento, en los años noventa, de rozamientos muy débiles con películas de carbono adamantino. En estas capas de estructura amorfa, cada uno de los átomos de carbono se halla unido a cuatro átomos vecinos, como en el diamante, pero los átomos están dispuestos de forma irregular. Por sí solas, las películas de carbono adamantino no consiguen llevar el rozamiento a valores próximos a la suprafricción, salvo en el caso de las películas hidrogenadas (en las que una fracción de los átomos de carbono se enlaza con átomos de hidrógeno) inmersas en alto vacío o en gases inertes como el nitrógeno. Así, para obtener coeficientes de rozamiento menores de 0,05, el centro de investigación de Nissan en Yokohama explora una nueva metodología: el uso de un revestimiento de carbono adamantino no hidrogenado más aditivos de lubrificación, de ésteres, que no contienen ni fósforo ni azufre. En 2004 se obtuvieron por este método coeficientes de rozamiento menores de 0,02.

NILES FLEISCHER/NANOMATERIALS/POUR LA SCIENCE



5. NANOPARTICULAS DE BISULFURO DE TUNGSTENO (WS_2) constituidas por hojillas concéntricas de espesor monomolecular. Pueden servir de lubrificante: al ser aplastadas en los puntos de contacto entre dos sólidos, se fragmentan en pequeñas lamelas, que recubren de forma progresiva las superficies de los sólidos y las lubrifican.

La clave del fenómeno reside en el hecho de que la superficie de carbono adquiere una gran lisura y se recubre de grupos hidroxilo (–OH). Además, la capa de carbono adamantino, casi tan dura como el diamante, protege a las superficies frente al desgaste. Nissan confía desarrollar con prontitud esta lubrificación "limpia" y equipar así piezas de máquinas térmicas, de micromáquinas y, en el campo de la medicina, de prótesis e instrumentos quirúrgicos. Esta empresa japonesa produce ya en serie motores de automóvil, donde los contactos entre leva y empujador (elementos del dispositivo que acciona una válvula), la parte del motor más sensible al rozamiento, están revestidos de carbono adamantino.

La tribología, que comprende desde descubrimientos de física fundamental hasta el desarrollo de avanzados sistemas de lubrificación, se encuentra, pues, en efervescencia. El rozamiento ultradébil o la suprafricción no constituyen todavía realidades cotidianas, pero han dejado de ser sólo una utopía.

El autor

Jean Michel Martin es profesor en la Escuela Central de Lyon. Realiza su investigación en el laboratorio de tribología y dinámica de sistemas del mismo centro. Es miembro del Instituto Universitario de Francia.

Bibliografía complementaria

ROZAMIENTO A ESCALA ATÓMICA. J. Krim en *Investigación y Ciencia*, n.º 246, págs. 46-53; diciembre de 1996.

SUPERLUBRICITY ET GRAPHITE. M. Dienwiebel et al. en *Physical Review Letters*, vol. 92, n.º 12, artículo 126.101; 2004.

FRICTION AT THE NANO-SCALE. J. Krim en *Physics World*, febrero de 2005.

SLIPPERY NANOWORLD. E. Gnecco et al. en *Europhysics News*, vol. 36, n.º 1, 2005.

Globalización y



JEAN-FRANCOIS PODEVIN

pobreza

La globalización lo mismo puede ayudar que perjudicar a los pobres del mundo. El reto estriba en maximizar la ayuda y minimizar los perjuicios

Pranab Bardhan

Salvo el terrorismo internacional y el calentamiento global, pocos temas serán foco de discusiones tan acaloradas como la globalización y su efecto en la pobreza y las desigualdades. Apenas si conozco a alguien que no sustente opiniones muy firmes al respecto y que no se sienta interesado por el bienestar de los desheredados del mundo. La prensa económica y los funcionarios internacionales más influyentes aseveran, llenos de confianza, que el mercado libre mundial amplía las perspectivas de los pobres, mientras que los activistas de la protesta sustentan con la misma intensidad la creencia contraria. Sin embargo, la robustez de las convicciones de alguien suele estar en proporción inversa al número de pruebas objetivas, sólidas, que conoce.

Como es costumbre en los debates públicos más encendidos, distintas personas entienden de modo distinto una misma palabra. Algunos interpretan que "globalización" significa que las técnicas de la comunicación y los movimientos de capital llegan a todo el globo, otros piensan en la derivación de actividades a otros países de las empresas de los países ricos y hay quienes ven en la globalización un sinónimo de capitalismo empresarial o de hegemonía cultural y económica estadounidense. Por ello, lo mejor es dejar claro en las primeras líneas de este artículo que me refiero primordialmente a la globalización económica: la expansión del comercio y las inversiones exteriores. ¿De qué modo afecta ese proceso a los salarios, a las rentas y al acceso a los recursos en el caso de los países más pobres? Es ésta hoy una de las preguntas más importantes de las ciencias sociales.

Desde la II Guerra Mundial y durante un cuarto de siglo, la mayoría de los países en vías de desarrollo de Africa, Asia e Iberoamérica se aislaron económicamente del resto del mundo. Mas, a partir de entonces, la mayoría han abierto sus mercados. Por ejemplo, entre 1980 y 2000, el comercio en bienes y servicios aumentó en China del 23 al 46 por ciento del producto interior bruto (PIB), y del 19 al 30 por ciento en India. Esos cambios han causado muchos sufrimientos a los pobres de los países en vías de desarrollo, pero también han creado oportunidades que unos países han aprovechado y otros no, en función de sus instituciones políticas y económicas *nacionales*. (Lo mismo ocurre en EE.UU. con los trabajadores de salario bajo, pero los efectos de la globalización en los países ricos se salen de los límites de este artículo.) El resultado neto suele ser muy complejo y casi siempre depende del contexto, en contradicción con las declaraciones simplistas a favor o en contra de la globalización procedentes de los campos antagónicos. Entender y conocer las complejidades es esencial para acometer acciones eficaces.

Ni veneno ni panacea

Las razones a favor del libre comercio se basan en el añejo principio de las ventajas relativas: la idea de que a los países les va mejor económicamente cuando exportan los bienes que mejor producen e importan lo demás. La opinión mayoritaria entre los economistas es favorable a ese principio; ello no impide que mantengan serias

discrepancias acerca del balance de los beneficios potenciales y los costos reales derivados del comercio y acerca de la importancia de la protección social para los pobres. Los librecambistas creen que la marea en ascenso de las inversiones y la especialización internacionales pondrá a todos a flote. Señalan otros que una gran parte de las poblaciones pobres carece de la capacidad de adaptación, reequipamiento y reubicación requerida por unas condiciones de mercado variables. Sostienen esos expertos que los beneficios de la especialización se materializan a la larga, escala de tiempo en la que se supone que personas y recursos gozan de una movilidad total, mientras que los ajustes pueden causar trastornos a corto plazo.

El debate entre los economistas es un modelo de cortesía comparado con lo que pasa en la calle. El alegato de fondo de los antiglobalizadores es que la globalización está haciendo más ricos a los ricos y más pobres a los pobres; los proglobalizadores aseveran que ayuda a los pobres. Pero si nos atenemos a los hechos, la cuestión resulta bastante más complicada. Con los datos recogidos por distintos organismos, procedentes de encuestas a las familias, el Banco Mundial estima qué fracción de la población de los países en desarrollo queda por debajo del límite de pobreza, establecido en un dólar diario a precios de 1991, criterio que, pese a su tosquedad, facilita las comparaciones internacionales. Así medida, la pobreza extrema está disminuyendo en su conjunto (*véase la figura 5*).


1. Arrozal, Provincia de Jiangxi, China, principios de los años noventa.

GREG BAKER *AP Photo*

Esa tendencia es particularmente acusada en el este, el sur y el sudeste asiático. La pobreza ha retrocedido mucho en China, India e Indonesia, países que se han caracterizado hace tiempo por una pobreza rural masiva y que, juntos, responden de aproximadamente la mitad de la población de los países en vías de desarrollo. Entre 1981 y 2001 el porcentaje de población rural que vivía con menos de un dólar diario decreció del 79 al 27 por ciento en China, del 63 al 42 por ciento en India, y del 55 al 11 por ciento en Indonesia.

Aunque los más pobres no estén en general empobreciéndose más, nadie ha demostrado que la mejora de su situación se deba sobre todo a la globalización. En China, esa tendencia podría atribuirse a factores internos, tales como la expansión de las infraestructuras , la masiva reforma agraria de 1978 (que disolvió las comunas de la era maoísta), los cambios en los precios de compra del grano y la relajación de las restricciones a la emigración del campo a la ciudad. De hecho, una parte sustancial del descenso de la pobreza ya había tenido lugar a mediados de los años ochenta, antes de los grandes avances en comercio exterior e inversiones. De los más de 400 millones de chinos elevados por encima del límite internacional de pobreza entre 1981 y 2001, más de tres cuartas partes lo habían cruzado ya en 1987.

Análogamente, la reducción de la pobreza rural en la India podría atribuirse a la propagación de la Revolución Verde en la agricultura, a los programas oficiales contra la pobreza y a los movimientos sociales, no a la liberalización del comercio de los años noventa. En Indonesia, la Revolución Verde, las políticas macroeconómicas, la estabilización de los precios del arroz y las inversiones en infraestructuras rurales desempeñaron un papel determinante en la gran reducción de la pobreza rural. Desde luego, la globalización, al ampliar los puestos de trabajo en industrias que emplean mucha mano de obra, ha contribuido a sacar de la pobreza a muchos chinos e indonesios desde mediados de los años ochenta (aunque no tanto en la India, por diversas razones internas institucionales y políticas). Pero éste es

Resumen/Globalización y pobreza

- La expansión del comercio y las inversiones internacionales es una de las tendencias predominantes de nuestra época. Sin embargo, políticos y críticos propenden a tratar de la globalización sin examinar los datos que les brindan las ciencias sociales.
- La moderna era de la globalización ha coincidido con una reducción sostenida de la proporción de personas que viven en la pobreza extrema. Ante esa observación, podría extraerse la conclusión de que la globalización, en conjunto, no está haciendo más pobres a los pobres. Con todo, no cabe atribuirle excesivos méritos por la disminución de la pobreza, que en muchos casos fue anterior a la liberalización del comercio.
- Los países con unos buenos fundamentos económicos —mejora de infraestructuras, estabilidad política, implantación de reformas agrarias, organización de una buena seguridad social y remoción de obstáculos en el acceso a los créditos— tienden a lograr reducciones en la pobreza. Aunque la globalización ayuda, sólo es un factor entre muchos.


2. Barrio del Malecón, Shangai, 1999.

EUGENE HOSHIKO *AP Photo*

sólo uno de los muchos factores responsables del progreso económico de los últimos 25 años.

Quienes dudan de los beneficios de la globalización señalan que la pobreza se ha mantenido tercamente alta en el Africa subsahariana. Entre 1981 y 2001 la fracción de africanos que vivían por debajo del límite internacional de la pobreza aumentó del 42 al 47 por ciento. Pero ese deterioro parece tener menos que ver con la globalización que con unos regímenes políticos fracasados o inestables. Si acaso, la inestabilidad redujo su participación en la globalización, ya que ahuyentó a muchos inversores y empresarios extranjeros. Las políticas volátiles multiplican los factores que actúan a largo plazo: el aislamiento geográfico, las enfermedades, la excesiva dependencia de un pequeño número de productos de exportación y la lenta difusión de la Revolución Verde [*véase* "¿Podrá erradicarse la pobreza extrema?", por Jeffrey D. Sachs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2005].

Maquilas

Por lo general, la competencia en el mercado global recompensa, en cualquier país, a las personas con iniciativa, preparación profesional, información y espíritu empresarial. En todas partes, los pobres se encuentran en desventaja al no poder acceder al capital y a las oportunidades de aprender nuevos oficios. Los trabajadores de algunos países en vías de desarrollo —México, por ejemplo— están perdiendo sus puestos en las fábricas, intensivas en trabajo, en favor de sus homólogos asiáticos. A la vez, las inversiones extranjeras han aportado nuevos empleos. En conjunto, el efecto parece ser de mejora neta. En México, la pobreza vinculada a los bajos salarios está disminuyendo en las regiones que hoy participan más en la economía internacional, aun descontando que las personas más preparadas y emprendedoras migran a esas regiones, aumentando en ellas los salarios independientemente de lo atribuible a la globalización. Un estudio reciente de Gordon H. Hanson, de la Universidad de California en San Diego, que sólo tuvo en cuenta a la población nacida en una región concreta (o sea, sin contar los inmigrantes), descubrió que durante los años noventa los ingresos medios en los estados mexicanos más afectados por la globalización aumentaron un 10 por ciento más que en los estados menos afectados.

En las economías asiáticas pobres, como las de Bangladesh, Vietnam y Camboya, trabaja actualmente un gran número de mujeres en talleres de confección de ropa para la exportación. Sus sueldos son bajos a escala internacional, pero mucho mayores de lo que ganarían en otras actividades a su alcance. Quienes se sienten indignados por el comportamiento explotador de los talleres de ensamblaje o de confección para la exportación (las maquilas) deben apreciar la mejora relativa en la situación material y social de esas mujeres. Un informe de Oxfam de 2002 citaba estas palabras de Rahana Chaudhuri, una madre de 23 años que trabaja en la industria de la confección de Bangladesh:

> El trabajo es duro, y no nos tratan bien. Los encargados no respetan a las mujeres. Pero la vida es peor para quienes trabajan fuera de aquí. Si volviera a mi pueblo, tendría menos dinero. Fuera de las factorías, la gente que vende en las calles o acarrea ladrillos en las obras gana menos que nosotras. Hay pocas opciones más. Desde luego que deseo mejores condiciones. Pero, para mí, este trabajo significa que mis hijos tendrán bastante para comer y que sus vidas pueden ser mejores.

En 2001, Naila Kaber, de la Universidad de Sussex, y Simeen Mahmud, del Instituto de Estudios para el Desarrollo de Bangladesh, realizaron en Dhaka una encuesta entre 1200 mujeres obreras. Descubrieron que los ingresos medios mensuales de las trabajadoras de las maquilas era un 86 por ciento mayores que los de los otros asalariados que vivían en los mismos suburbios.

Otro indicio de esa mejora relativa puede calibrarse por lo que ocurre cuando desaparecen tales oportunidades. En 1993, adelantándose a la prohibición de EE.UU. de importar productos elaborados con mano de obra infantil, la industria de la confección de Bangladesh despidió a unos 50.000 niños. La UNICEF y los grupos de ayuda locales investigaron qué fue de ellos. Unos 10.000 regresaron a la escuela, pero el resto acabaron en ocupaciones muy inferiores, incluida la de picapedrero y la prostitución. No excusa esto las horribles condiciones de trabajo en las maquilas, por no mencionar los casos de trabajos vejatorios o peligrosos, pero los activistas deben reconocer lo severamente limitadas que son para los pobres las oportunidades existentes y las posibles consecuencias no deseadas de unas políticas de "comercio justo".

Raíces locales de la pobreza

La integración en la economía internacional reporta no sólo oportunidades,



3. Refugiadas birmanas en una maquila, Mae Sot, Tailandia, años noventa.

ALISON WRIGHT *Corbis*

sino también problemas. Aun cuando los nuevos puestos de trabajo son mejores que los anteriores, la transición puede resultar penosa. La mayoría de los países pobres brindan una escasa protección social efectiva a quienes han perdido su empleo y aún no han hallado otro. Además, un número elevado de pobres trabajan en pequeñas explotaciones agrícolas o empresas familiares. Las principales limitaciones que padecen son internas: falta de acceso a los créditos, infraestructuras deficientes, funcionariado venal y derechos de propiedad de la tierra inciertos. Estados débiles, regímenes irresponsables, desequilibrios en la distribución de la riqueza y políticos y burócratas ineptos o corruptos se combinan para cerrar a los pobres el camino a las oportunidades. La apertura de mercados sin corregir tales restricciones internas obliga a la gente a competir con una mano atada a la espalda. Y se agudiza la pobreza.

Al revés, la apertura de una economía al comercio y a los flujos de capital a largo plazo no tiene por qué empobrecer más a los pobres, si las políticas y las instituciones nacionales cumplen su papel; en particular, si facilitan el cambio hacia productos más comerciables y ayudan a los trabajadores a iniciarse en nuevas ocupaciones.

Ello se evidencia si comparamos las realidades de distintos países. Aunque las economías insulares de Mauricio y Jamaica tenían unas rentas per cápita similares a principios de los años ochenta, sus ejecutorias económicas desde aquellas fechas han divergido espectacularmente; mientras la primera gozaba de unas mejores instituciones participativas y del imperio de la ley, la segunda se enfangaba en el crimen y la violencia. A principios de los años sesenta, Corea del Sur y Filipinas tenían unas rentas per cápita similares, pero las instituciones políticas y económicas de Filipinas no mejoraron (la riqueza se concentró en pocas manos), por lo que aún sigue siendo un país en vías de desarrollo, mientras que Corea del Sur ha ingresado en la categoría de los desarrollados. Botswana y Angola son dos países exportadores de diamantes de Africa del Sur, el primero democrático y en crecimiento rápido, el segundo asolado por la guerra civil y el saqueo.

Las experiencias de estos y otros países demuestran que nada abona que las fuerzas de la globalización hayan de obstaculizar los programas contra la pobreza. Los países no deben abandonar los programas sociales en aras de su posición económica; de hecho, los objetivos sociales y económicos pueden apoyarse mutuamente. La reforma agraria, la ampliación de créditos y servicios para pequeños empresarios, el reciclado y la ayuda económica a los trabajadores desplazados, los programas de obras públicas para los desempleados y las prestaciones básicas educativas y sanitarias pueden aumentar la productividad de los trabajadores de la industria y el campo y contribuir así a la competitividad global de un país. Puede que tales programas requieran replantear las prioridades presupuestarias y unas estructuras políticas y económicas más responsables, pero los obstáculos son en su mayoría internos. Cerrar, en cambio, la economía al comercio internacional no reduce el poder de los intereses creados: los de terratenientes, políticos y burócratas, y de los ricos que disfrutan de las subvenciones oficiales. Así pues, contra lo que afirman sus críticos, la globalización no es la causa principal de los problemas de los países en vías de desarrollo; ni la globalización es siempre la principal solución a esos problemas, según proponen los librecambistas más entusiastas.

¿Y el respeto al medio? Numerosos ecologistas aducen que la integración internacional favorece la sobreexplotación de los recursos



4. Burdel junto a la estación ferroviaria de Mumbai, India, 2002.

naturales más frágiles, como los bosques y los caladeros de pesca, en perjuicio del sustento de los pobres. Una acusación muy corriente contra las empresas transnacionales es que acuden de preferencia a los países con normas ambientales laxas. Abundan las anécdotas, pero los investigadores han elaborado muy pocas estadísticas. Una de ellas, publicada en 2003 por Gunnar Eskeland, del Banco Mundial, y Ann Harrison, de la Universidad de California en Berkeley, se refería a México, Marruecos, Venezuela y Costa de Marfil. Hallaron pocas pruebas de que tales empresas decidieran invertir en dichos países para eludir el costo de la lucha contra la contaminación en los países ricos; el factor más importante de los considerados para fijar el monto de la inversión era la dimensión del mercado local. Dentro de cada industria, las plantas extranjeras tienden a contaminar menos que sus pares locales.

Igual que la pobreza persistente, una normativa ambiental laxa constituye un fracaso político o institucional interno. La falta de unos derechos de propiedad bien definidos o bien protegidos, así como la ausencia de una regulación de los recursos de propiedad comunal, suele conducir a abusos. En respuesta a las presiones de los grupos políticos potentes, los gobiernos han mantenido bajos los precios de valiosos recursos naturales: el agua de riego en India, la energía en Rusia y las concesiones madereras en Indonesia y Filipinas. No sorprende que así se esquilmen. Desde luego, si un país abre sus mercados sin enderezar esa situación, se agravarán sus problemas ecológicos.

Del dicho al hecho

Por suerte, los dos bandos del debate están llegando (lentamente) a un cierto acuerdo. En algunas áreas, ambos ven las posibilidades de coordinar e implicar a las empresas transna-

Porcentaje de la población que vive con menos de 1 dólar diario
70
60
50
40
30
20
10
0
China
India
Africa subsahariana
Sur de Asia, salvo India
Este de Asia, salvo China
Iberoamérica y Caribe
Oriente Medio y Africa del Norte
Europa del Este y Asia Central
TODAS LAS REGIONES
1981 1984 1987 1990 1993 1996 1999 2001
Año

5. LA POBREZA EXTREMA ha retrocedido a lo largo de las dos últimas décadas, incluido el período a lo largo del cual la globalización ha prendido. Por tanto, es incorrecto sostener que la globalización hace más pobres a los pobres. Las regiones que se han estancado (Africa, especialmente) están en gran medida desgajadas de la economía global, por lo que la gravedad de su situación debe tener otras causas.

ALEX MAJOLI *Magnum Photos* (*arriba*); JANA BRENNING; FUENTE: BANCO MUNDIAL (*abajo*)

cionales, a las organizaciones multilaterales, a los gobiernos de los países en vías de desarrollo y a la administración local en programas de ayuda a los pobres. Por encima de la pasión del debate y tomando como fundamento aquello en que cada vez hay más cooperación y consenso, las alianzas internacionales aliviarían la pobreza que sigue oprimiendo las vidas de miles de millones de personas. He aquí algunas de las medidas de que se habla.

Control de capitales. El flujo de la inversión internacional se compone tanto de capital a largo plazo (equipamientos) como de capital especulativo a corto plazo (acciones, bonos y efectivo). Este segundo componente, mudable con el clic de un ratón de ordenador, puede provocar movimientos mundiales a modo de estampidas de ganado y crear daños inmensos en las economías frágiles. Un ejemplo fue la crisis financiera asiática de 1997. Tras el ataque de los especuladores sobre la moneda tailandesa, el baht, la tasa de pobreza en la Tailandia rural subió un 50 por ciento sólo en un año. En Indonesia, una retirada masiva de capitales a corto plazo hizo que los salarios industriales reales bajaran un 44 por ciento. Muchos economistas (incluidos los partidarios del libre comercio) reconocen la necesidad de algún control sobre los flujos de capital a corto plazo, en particular si los organismos financieros y las normas bancarias nacionales son endebles. Aunque se coincide en que China, India y Malasia escaparon a lo peor de aquella crisis gracias a unos controles rigurosos de la fuga de capitales, los economistas discrepan sobre qué tipos de control ejercer y qué efectos tendrían sobre el precio del dinero.

Menos proteccionismo. El mayor obstáculo al que se enfrentan muchos países pobres no es un exceso de globalización, sino su escasez. Para los desheredados del mundo se hace difícil salir de la pobreza cuando los países ricos (y los mismos países pobres) restringen las importaciones y subvencionan a sus propios industriales y agricultores. Se calcula que los países en vías de desarrollo pierden por los aranceles y subsidios agrarios de los países ricos unos 45 millones de dólares, y por las barreras comerciales a los textiles y ropa, unos 24.000 millones de dólares. El daño excede la ayuda de los países ricos a los pobres. Esa pérdida no se reparte por igual entre los países pobres. Algunos se beneficiarían más que otros de la supresión de esas barreras.



6. Colegio electoral, Gaborone, Botswana, 2004.

THEMBA HADEBE *AP Photo*

Medidas antitrust. Los pequeños exportadores de los países pobres carecen muchas veces de redes de comercialización y de marcas para introducirse en los mercados de los países ricos. Aunque las empresas minoristas transnacionales pueden ayudarlos, los márgenes y comisiones que cargan suelen ser muy altos. Las prácticas comerciales restrictivas de esos intermediarios internacionales son difícilmente demostrables, pese a existir un cúmulo de pruebas circunstanciales. El mercado internacional del café, por ejemplo, está dominado por cuatro compañías. A principios de los años noventa, las ganancias de los países exportadores de café fueron de unos 12.000 millones de dólares y las ventas al por menor de 30.000 millones. En 2002, las ventas al por menor se habían doblado de lejos, pero los países productores de café ingresaron aproximadamente la mitad de las ganancias de diez años antes. El problema no está en los mercados mundiales, sino en la dificultad de acceso a esos mercados o en la bajada de los precios que cobran los productores, debido al poder cuasimonopolístico de que goza un grupo restringido de minoristas. En ciertos ramos, las empresas se ponen de acuerdo para fijar los precios. Algunos economistas han propuesto instaurar una agencia internacional de investigación antitrust. Aunque una tal agencia careciese de suficiente poder coer-



7. Soldado adolescente del gobierno, Benguela, Angola, 1993.

ARMANDO FRANCA *AP Photo*

citivo, podría movilizar la opinión pública y redoblar la influencia de las agencias antitrust de los países en vías de desarrollo. Además, con programas de certificación de calidad internacionalmente aprobados se puede ganar la aceptación de los productos de los países pobres en los mercados mundiales.

Programas sociales. Según muchos economistas, para que un país progrese con el comercio, el gobierno debería redistribuir el patrimonio y las rentas, de modo que los ganadores con la política de apertura de la economía compartieran sus ganancias con los perdedores. Ciertos programas suscitan poca controversia, tales como los que ayuden a los trabajadores en paro a adquirir nuevos conocimientos y reubicarse. Las becas que facilitan la escolarización de los niños de familias pobres se han mostrado más eficaces para reducir el trabajo infantil que la prohibición de importaciones.

Investigación. La Revolución Verde desempeñó un papel fundamental en la lucha contra la pobreza en Asia. Nuevas alianzas público-privadas internacionales podrían ayudar a desarrollar otros productos necesarios para los pobres (como medicinas y vacunas). Bajo el régimen internacional de patentes en vigor, las empresas farmacéuticas internacionales carecen de incentivo suficiente para efectuar investigaciones costosas sobre enfermedades como la malaria o la tuberculosis, que al año matan a millones de personas en los países pobres. Pero organismos proveedores de fondos, como la Organización Mundial de la Salud, grupos como Médicos Sin Fronteras y fundaciones privadas como la Fundación Bill & Melissa Gates, empiezan a cooperar para el desarrollo de la investigación.

Reformas de las leyes inmigratorias en los países ricos. Un programa que permitiese acoger “trabajadores inmigrantes” en los países ricos a un mayor número de obreros no cualificados haría más por reducir la pobreza que otras formas de integración internacional. El clima actual no es, sin embargo, muy propicio a esa idea.

Los eslóganes antiglobalizadores simplistas y las peroratas sobre los rotundos beneficios del libre comercio no sirven a la causa de la lucha contra la pobreza. Una apreciación de la complejidad de los temas y unas políticas nacionales e internacionales adecuadamente entretejidas serían más fructíferas.

El autor

Pranab Bardhan enseña economía en la Universidad de California en Berkeley. Dirigió el *Journal of Development Economics* entre 1985 y 2003 y actualmente es copresidente de una red internacional de investigación sobre las desigualdades y el rendimiento económico financiada por la Fundación MacArthur.

Bibliografía complementaria

MOVING TO GREENER PASTURES? MULTINATIONALS AND THE POLLUTION HAVEN HYPOTHESIS. G. S. Eskeland y A. H. Harrison en *Journal of Development Econoomics*, vol. 70, n.º 1, págs. 1-24; febrero 2003.

THE IMPACT OF GLOBALIZATION ON THE POOR. Pranab Bardhan en *Globalization, Poverty, and Inequality.* Dirigido por S. M. Collins y C. Graham. Brookings Institution Press; Washington, D.C., 2004.

GLOBALIZATION, GENDER AND POVERTY: BANGLADESHI WOMEN WORKERS IN EXPORT AND LOCAL MARKETS. N. Kabeer y S. Mahmud en *Journal of International Development*, vol. 13, n.º 1, págs. 93-109; enero 2004.

HOW HAVE THE WORLD'S POOREST FARED SINCE THE EARLY 1980'S? Shaohua Chen y Martin Ravallion en *Bank Research Observer*, vol. 19, n.º 2, págs. 141-170; otoño 2004.

GLOBALIZATION AND LABOR INCOME IN MEXICO. G. H. Hanson. National Bureau of Economic Reseach Working Paper n.º 11.027. Cambridge, enero 2005.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Norbert Treitz

Paso a paso

¿Cómo sigue la sucesión 1 4 10 19 31...? Una posibilidad, pero en ningún caso la única correcta, consiste en concebirla como una sucesión aritmética de segundo orden. Esta es una sucesión cuya sucesión diferencia —la sucesión de las diferencias de términos consecutivos de la sucesión— es una sucesión aritmética corriente, en nuestro caso 3 6 9 12... Las sucesiones aritméticas corrientes se denominan en este contexto "de primer orden". Según esto, el siguiente término de nuestra sucesión es 46.

Si, a la inversa, formamos la sucesión suma de la sucesión de los números naturales 0 1 2 3..., obtendremos una sucesión aritmética de segundo orden. Se trata de la sucesión de los números triangulares 0 1 3 6 10 15 21..., con la fórmula genérica $n(n + 1)/2$, que, "en esencia", aumenta cuadráticamente, como el área del triángulo que se obtiene al disponer simétricamente 1, 3, 6,... bloques en filas apiladas unas sobre otras. (A tener en cuenta: un término de una sucesión suma no es la suma de dos términos consecutivos, sino la suma de todos los términos anteriores de la sucesión original.)

Esto se puede extender a órdenes superiores. Al formar la sucesión suma de los números triangulares se obtienen los números tetraédricos 0 1 4 10 20 35..., que "en esencia" tienden como n^3 hacia infinito. En el triángulo de Pascal se encuentran estas sucesiones en las paralelas a los lados: la más externa, de orden cero: 1 1 1 1 1...; después la de primer orden, con 1 2 3 4..., y así sucesivamente.

Las sucesiones aritméticas de segundo orden resultan útiles en problemas como el siguiente: consiga usted con el menor número posible de sumandos, de los que el primero y el último tienen el valor 1, la suma 100, y además de tal manera que cada sumando como mucho sólo se distinga de su antecesor en 1. La solución es: 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10 + 9 + 8 + 7 + 6 + 5 + 4 +3 + 2 +1 con las sumas parciales 0 1 3 6 10 15 21 28 36 45 55 64 72 79 85 90 94 97 99 100.

Tiene ese problema gran similitud con este otro: conduzca en tan poco tiempo como sea posible de un cruce al siguiente semáforo en rojo o de una parada de metro hasta la siguiente, con la condición —no del todo realista— de que la aceleración y la deceleración tengan la misma magnitud. La solución es: acelerar al máximo durante la primera mitad y durante la segunda mitad frenar con la máxima fuerza.

Esto no es ni muy ecológico ni muy económico, pero sí bastante claro. El problema aritmético es la "discretización" del problema de tránsito. La velocidad ya no cambia continuamente, sino que es constante en pequeños intervalos de tiempo —digamos segundos— y cambia de golpe de un segundo a otro. Nuestros sumandos son los valores recorridos en cada segundo. En un auto discretizado, cada segundo se notaría un empellón en la espalda o en el pecho. Pero con un aumento de la precisión en la discretización, y correspondientemente con una unidad de tiempo menor, aumentan la comodidad en la conducción y el realismo. Si bien el cálculo se hace más largo, permanece en principio tan sencillo como en el ejemplo de arriba.

Un juego de tablero: La discretización también se puede aplicar a dos dimensiones. Un ejemplo en el más elemental de los problemas de la conducción: ¿Qué he de hacer para que el radio de curvatura de mi recorrido no sea mayor que el de la carretera? Es decir: ¿Cómo evito que me salga de la carretera en la curva? La respuesta es conocida: conducir suficientemente despacio, sobre todo cuando la curva es estrecha, el pavimento resbaladizo o ambas cosas.

Para la versión discreta sólo necesitamos papel y lápiz. Primero se delimita la pista marcando cadenas de casillas que hacen de vallado y por tanto prohibidas para los coches. Lo que queda es un laberinto de calles, con una anchura de varias casillas y algunas curvas. Las casillas de la salida y la línea de meta se marcan de forma especial (*véase la figura 1*).

La regla de juego esencial es la siguiente: el "coche" marcha en una tirada m pasos hacia el este y n hacia el norte, donde m y n son números enteros positivos o (para movimientos dirigidos al oeste o al sur) negativos; de una tirada a otra pueden aumentar o disminuir en 1 o mantenerse iguales, y ello de manera independiente para m y n. Al comenzar ambos valen 0. Se puede atravesar la meta sin frenar previamente. Las vallas no se pueden pisar ni atravesar. Quien alcance una casilla prohibida, tiene que volver a la salida y empezar de nuevo con $m = n = 0$ (sin estancia en el hospital; el golpe contra la valla resulta leve).

El objetivo del juego es atravesar la meta con el mínimo número posible de tiradas. Para ello los jugadores pueden hacer correr sus coches en una misma hoja o en copias de la misma pista. Puede haber varios coches al mismo tiempo en una misma casilla. Otras reglas convertirían el juego en una especie de parchís y nos alejarían de la cinemática simulada.

Se nota enseguida que en las curvas cerradas las tiradas han de ser suficientemente cortas. Los que se pasan de precavidos se detienen incluso en cada curva. Pero también se puede aprender a pensar por separado en dos dimensiones.

1. Un recorrido en la pista discretizada de una carrera de coches. Las teclas del teclado numérico correspondientes a las nueve aceleraciones posibles aparecen escritas en rojo en cada posición del coche; éstas y los colores de los círculos nos muestran las direcciones de las aceleraciones.

¿Cuál es la interpretación física? Los pasos *m* y *n* son las componentes del vector velocidad. Sólo se las puede cambiar en una unidad por tirada. A tal obligan las posibilidades limitadas de aceleración y frenada. A diferencia del coche real, cuyo comportamiento es independiente de los puntos cardinales, el coche simulado tiene mayor libertad en la dirección de las diagonales.

A un conductor discretizado, igual que a uno real, se le recomienda decelerar en una curva hacia el interior de ésta, sin tener que llegar necesariamente a pararse. Tiradas sucesivas con aceleración constante crean parábolas; una parábola estrechísima puede degenerar en una línea de ida y vuelta.

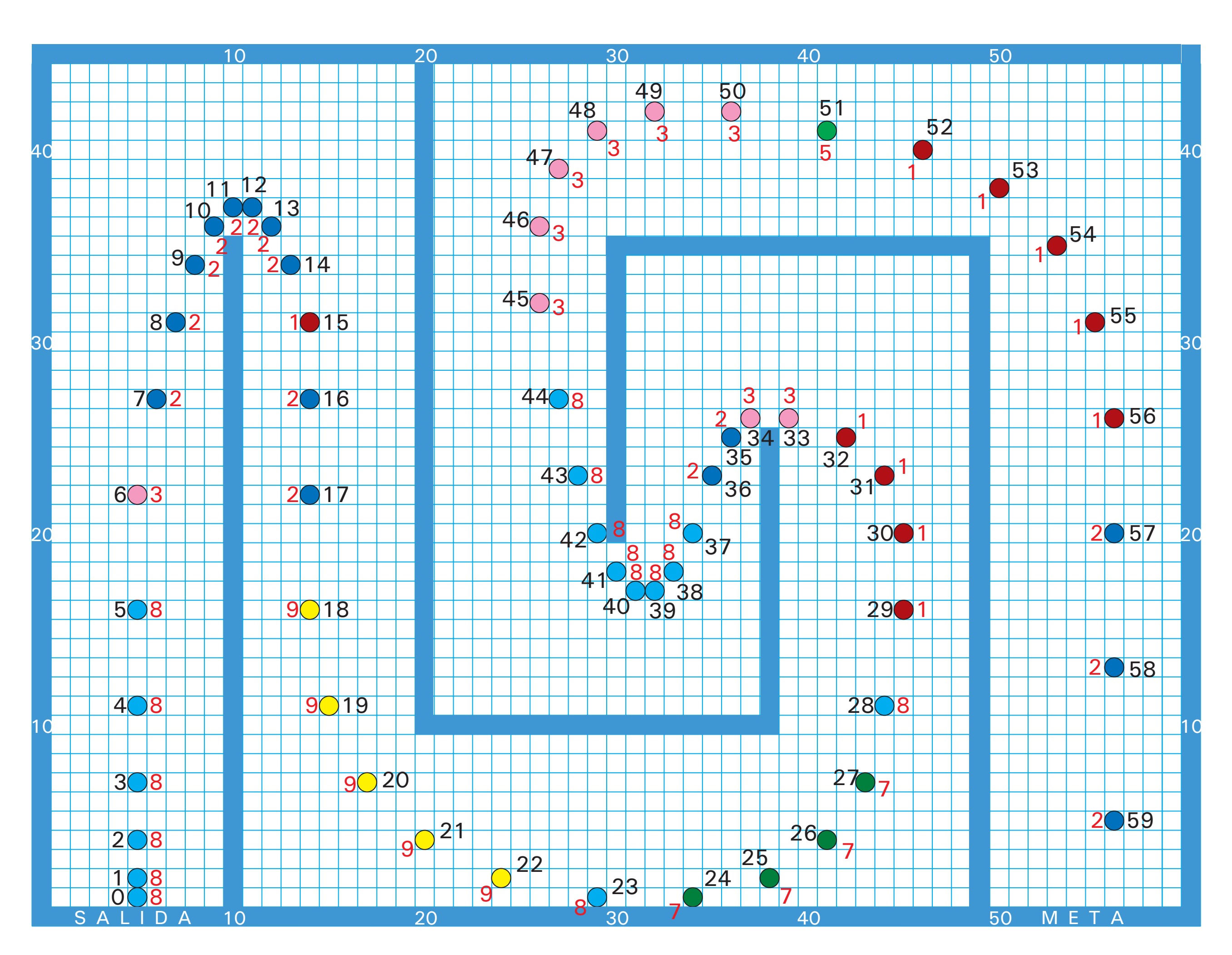
Guardan un parentesco muy cercano con nuestro juego en papel ciertos juegos de paciencia. Se trata de juegos en los que hay que dirigir sobre una superficie una bola entre muchos agujeros hasta la meta, para lo cual se inclina la superficie en torno a dos ejes horizontales, perpendiculares entre sí, mediante dos ruedas. Más vulgar, pero más adecuada para un aula grande, es una placa de cristal con almohadillas de corcho blanco en la cara inferior, colocada en el retroproyector: apretando sobre uno de los cuatro lados, la bola se pone en movimiento encima de la placa. Se trata de no dejar que choque contra ninguna de las vallas pegadas sobre ésta. En ambos casos el tiempo permanece "analógico", esto es, sin ningún ritmo obligado.

Registro del juego y reducción de datos: Cada instante de nuestro juego de lápiz y papel puede describirse con un par de coordenadas (*x*,*y*). Mientras la aceleración permanezca constante, lo mismo la *x* que la *y* formarán una sucesión aritmética de segundo orden. A través de los correspondientes puntos se pueden trazar parábolas, o líneas en el caso degenerado.

El contenido de datos (de información) de un campo de juego con *a* columnas y *b* filas de casillas es igual a log(*a*) + log(*b*). La base de los logaritmos utilizados es arbitraria, pero determina la unidad de medida en la que hemos de registrar la cantidad de datos. En el caso de logaritmos de base 10 se trata del "número de dígitos necesario": en un campo de juego de ancho 1000 y altura 1000 se necesitan $\log_{10}(1000) = 3$ dígitos para representar cada coordenada; esto es, seis cifras para la posición presente del coche. Si queremos reproducir completamente un juego con 100 tiradas, se necesitarán 600 dígitos.

Los informáticos prefieren calcular en base 2, no en base 10. La correspondiente unidad de medida para la cantidad de datos es el bit.

En este cálculo no hemos tenido en cuenta que nuestro coche viaja con tan escasa aceleración como prescriben las reglas del juego. La cantidad de datos para un coche



NORBERT TREITZ

t	x	v_x	a_x	y	v_y	a_y	Tecla
0	5	0	0	1	1	1	8
1	5	0	0	2	2	1	8
2	5	0	0	4	3	1	8
3	5	0	0	7	4	1	8
4	5	0	0	11	5	1	8
5	5	0	0	16	6	1	8
6	5	1	1	22	5	–1	3
7	6	1	0	27	4	–1	2
8	7	1	0	31	3	–1	2
9	8	1	0	34	2	–1	2
10	9	1	0	36	1	–1	2
11	10	1	0	37	0	–1	2
12	11	1	0	37	–1	–1	2
13	12	1	0	36	–2	–1	2
14	13	1	0	34	–3	–1	2
15	14	0	–1	31	–4	–1	1
16	14	0	0	27	–5	–1	2
17	14	0	0	22	–6	–1	2
18	14	1	1	16	–5	1	9
19	15	2	1	11	–4	1	9
20	17	3	1	7	–3	1	9
21	20	4	1	4	–2	1	9
22	24	5	1	2	–1	1	9
23	29	5	0	1	0	1	8
24	34	4	–1	1	1	1	7
25	38	3	–1	2	2	1	7
26	41	2	–1	4	3	1	7
27	43	1	–1	7	4	1	7
28	44	1	0	11	5	1	8
29	45	0	–1	16	4	–1	1
30	45	–1	–1	20	3	–1	1
31	44	–2	–1	23	2	–1	1
32	42	–3	–1	25	1	–1	1
33	39	–2	1	26	0	–1	3
34	37	–1	1	26	–1	–1	3
35	36	–1	0	25	–2	–1	2
36	35	–1	0	23	–3	–1	2
37	34	–1	0	20	–2	1	8
38	33	–1	0	18	–1	1	8
39	32	–1	0	17	0	1	8
40	31	–1	0	17	1	1	8
41	30	–1	0	18	2	1	8
42	29	–1	0	20	3	1	8
43	28	–1	0	23	4	1	8
44	27	–1	0	27	5	1	8
45	26	0	1	32	4	–1	3
46	26	1	1	36	3	–1	3
47	27	2	1	39	2	–1	3
48	29	3	1	41	1	–1	3
49	32	4	1	42	0	–1	3
50	36	5	1	42	–1	–1	3
51	41	5	0	41	–1	0	5
52	46	4	–1	40	–2	–1	1
53	50	3	–1	38	–3	–1	1
54	53	2	–1	35	–4	–1	1
55	55	1	–1	31	–5	–1	1
56	56	0	–1	26	–6	–1	1
57	56	0	0	20	–7	–1	2
58	56	0	0	13	–8	–1	2
59	56			5			

2. Cuatro formas del registro: las jugadas de la figura 1 como posiciones (x,y) del coche en los correspondientes tiempos t, como velocidades (v_x, v_y), como aceleraciones (a_x, a_y) o su representación con teclas numéricas del 1 al 9.

que saltara en zigzag sería la misma. ¿Se puede simplificar el registro del juego?

La diferencia entre dos posiciones consecutivas define la velocidad (un vector) de nuestros coches discretizados en el correspondiente intervalo de tiempo. Las diferencias de las diferencias (las "sucesiones diferencia de segundo orden") corresponden a las aceleraciones. Pero ésta, según las reglas del juego, sólo puede ser –1, 0 o +1 para cada componente y tomar sólo uno de nueve (3 × 3) diferentes valores. Podemos registrar unívocamente todo el juego con la posición inicial, la velocidad inicial y los vectores de las aceleraciones de todas las tiradas (cada uno de estos mediante un dígito), y así con 100 dígitos (de hecho hasta con algo menos) en el caso de las cien tiradas.

Con este registro se puede reconstruir el desarrollo del juego. No se ha perdido ningún dato. Sin embargo, la posibilidad de esta reducción de datos funciona tan eficientemente debido sólo a las fuertes restricciones impuestas a la aceleración. Equivale, en la realidad, a una limitación en las posiciones que el coche pueda ocupar en los segundos siguientes. En otras palabras: equivale al principio de inercia.

Del papel al monitor: A los pocos días de que comprase mi primer ordenador con monitor (y 8 kilobytes de memoria), escribí un programa de carrera de coches en el que las nueve teclas del teclado numérico lateral se correspondían con las nueve combinaciones posibles de las componentes discretas –1, 0 y +1. Sucedía eso en 1980. Y era uno de esos programas que hoy no corren más rápido que entonces. En vez del teclado, se puede utilizar el ratón o un *joystick* como acelerador; cabe, pues, dar una forma más realista al juego aprovechando la mayor potencia de cálculo de hoy. De ahí saltamos a los juegos de carreras comerciales, que muestran la pista desde la perspectiva del conductor.

Si el lector dispone de un ordenador y sabe programarlo para que pinte un punto en una posición cualquiera del monitor, conviene que reproduzca el juego en su versión de papel. La razón esencial de ser de la simulación por ordenador para las clases no consiste en la mera reproducción de la realidad, sino en mostrar las relaciones de los enunciados teóricos (fórmulas, instrucciones de programación) y las magnitudes mensurables invisibles a través de flechas vectoriales que se muevan, o los balances de energía, paralelamente al transcurso visual.

Aún menos libertad: Imaginémonos ahora un conductor carente de imaginación, que tras el comienzo (a toda velocidad) sólo acelere tercamente hacia el sur. El registro será muy corto: aparte de los valores iniciales sólo contiene ese valor único de la aceleración constante. La curva dibujará entonces una parábola abierta hacia el sur. Denominemos a esta dirección "abajo" en vez de "sur" para obtener la parábola del tiro en un campo gravitatorio, cuya ecuación diferencial es $d^2y/dt^2 = -g$.

También podemos tomar decisiones complicadas, siempre que no violen las normas del transcurso del juego, o describir trayectorias preprogramadas. Podemos hacer que la aceleración dependa de la coordenada de posición o del valor del radio; así crearíamos un modelo de una masa oscilante en un muelle o el movimiento de un planeta alrededor del Sol, respectivamente. O bien podremos hacer que la aceleración dependa del vector velocidad, en cuyo caso tendremos así fenómenos de fricción. De esta manera nos encontramos con todas las simulaciones cinéticas más importantes.

Nos aproximamos de ese modo a la esencia de la física: si los fenómenos de la naturaleza sucedieran sin reglas y fueran sin excepción "puramente aleatorios", también podríamos llevar a cabo un registro de lo acaecido para la posteridad. El que determinados sucesos se repitan como las mareas, las estaciones o los ciclos de los eclipses solares y lunares permite ya una importante reducción de datos: viejos calendarios

NORBERT TREITZ

pueden reutilizarse en lo que concierne a ciertas características. Basta el registro para realizar predicciones, sin que sea obligado conocer las causas. Las máquinas que calculan las mareas con ruedas dentadas sólo extrapolan mediciones presentes; no calculan la complicada hidromecánica del perfil de la costa; de esa misma manera debieron utilizarse las piedras de Stonehenge para las predicciones de eclipses.

Reducción de datos: Si además se encuentran reglas, que en física la mayoría de las veces se formulan como ecuaciones diferenciales, bastará introducir los datos iniciales para sustituir ristras larguísimas de números.

El proceso guarda estrecha semejanza con la compresión de datos en archivos de imágenes. Si la imagen se compone de un fino granulado aleatorio, hay que almacenarla bit a bit. Repeticiones o zonas coloreadas permiten ya apreciables reducciones sin pérdida de información. Pero si la imagen representa la bandera japonesa, bastará con aportar el diámetro del círculo y los dos colores utilizados: el "programa para pintar" el círculo es muchísimo más corto que el registro de millones de píxeles. Un programa de tamaña sencillez equivale a la reducción de datos por una ley de la naturaleza. Responde a una de las propiedades más brillantes de nuestro cerebro: su poderosa reducción de datos en el ámbito de lo visible y en el lenguaje natural.

La expresión "ley de la naturaleza" se emplea de un modo metafórico. La naturaleza no puede ir en contra de sus propias leyes, aunque en el proceso de descubrimiento podemos encontrarnos con fallos o lagunas. La comparación con las reglas de juego en el papel cuadriculado es más adecuada: la naturaleza se comporta en cierta medida "regularmente", y nosotros intentamos averiguar estas reglas.

En suma, el que exista la física se debe a dos requisitos: que la naturaleza se comporte al menos en parte con fidelidad a unas reglas y que nuestro cerebro pueda reconocer algunas de ellas; con esa premisa podrá ligar (reducir) los datos entrantes y utilizarlos para predicciones.

Juan M.R. Parrondo

Espaciotiempo y azar

El mes pasado discutimos la sorprendente estructura del espaciotiempo según la teoría especial de la relatividad. Tiempo y espacio se mezclan cuando tratamos de relacionar cómo ven el mundo observadores que viajan a distinta velocidad. Supongamos dos observadores, *O* en reposo y *O’* moviéndose a una velocidad *v*, que colocan su origen de posiciones y de tiempos en un mismo punto. Si *O* asigna unas coordenadas (x,t) a un punto del espaciotiempo, las coordenadas (x',t') que asignará *O’* son obviamente distintas. En la vieja mecánica de Galileo y Newton, la relación entre ambas coordenadas es:

$$x' = x - vt \qquad t' = t$$

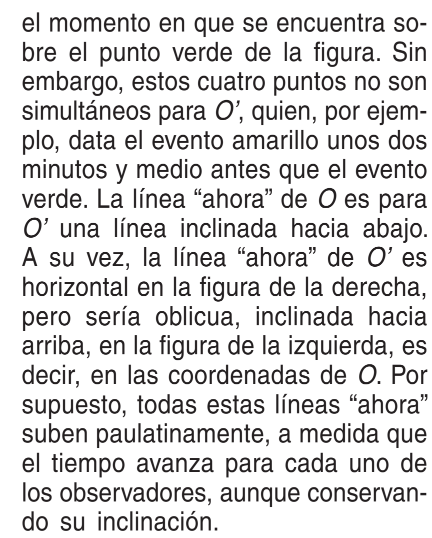
mientras que, en la teoría de la relatividad especial, las coordenadas de los dos observadores se relacionan a través de las llamadas *transformaciones de Lorentz*:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

en donde c es la velocidad de la luz.

Vamos a analizar algunas de las propiedades sorprendentes de las transformaciones de Lorentz. En los dos diagramas de la figura 1 representamos varios puntos del espaciotiempo, tal y como los ven *O* (*izquierda*), en reposo, y *O’* (*derecha*), que viaja hacia la derecha a una velocidad de 90.000 kilómetros por segundo (0,3 veces la velocidad de la luz). He escogido las distancias de modo que los eventos estén localizados en la Tierra (*punto verde*), Venus (*puntos azules*), Mercurio (*puntos magenta*) y el Sol (*punto amarillo*). Recordemos que las dos figuras representan los *mismos* puntos, pero localizados y datados por *O* y por *O’*. He dibujado también las trayectorias de *O* (*en azul*) y de *O’* (*en rojo*) y los llamados *conos de luz* de algunos eventos, en concreto de los dos eventos en Mercurio y del segundo en Venus. Los conos son las dos líneas que parten de cada punto del espaciotiempo y representan la trayectoria de dos rayos de luz emitidos desde dicho punto. Estos conos tienen una propiedad fundamental: su forma no varía de un observador a otro. Siempre presentan el mismo ángulo debido a que en las transformaciones de Lorentz la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores. Es una propiedad fácil de demostrar para el caso particular del cono de luz $x = ct$.

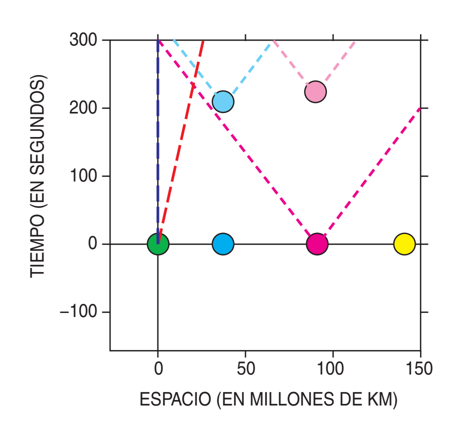
Observemos la serie de eventos que se encuentran a tiempo 0 para *O*, es decir, los cuatro puntos que están en el eje horizontal de la figura 1 (*izquierda*). Estos puntos son simultáneos para *O*, ya que les asigna la misma coordenada temporal, $t = 0$. Por ello, el eje horizontal se denomina la línea “ahora” para *O* en

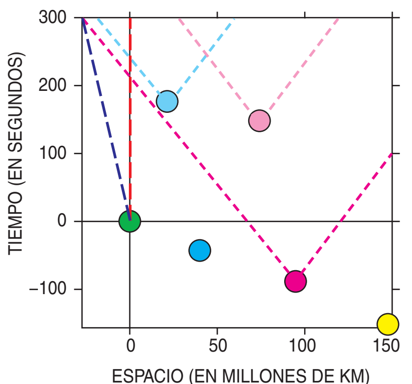


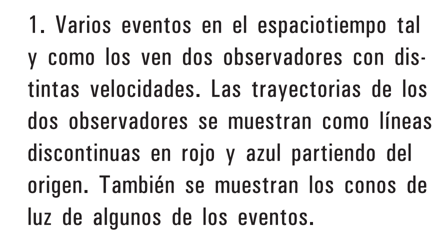
el momento en que se encuentra sobre el punto verde de la figura. Sin embargo, estos cuatro puntos no son simultáneos para *O’*, quien, por ejemplo, data el evento amarillo unos dos minutos y medio antes que el evento verde. La línea “ahora” de *O* es para *O’* una línea inclinada hacia abajo. A su vez, la línea “ahora” de *O’* es horizontal en la figura de la derecha, pero sería oblicua, inclinada hacia arriba, en la figura de la izquierda, es decir, en las coordenadas de *O*. Por supuesto, todas estas líneas “ahora” suben paulatinamente, a medida que el tiempo avanza para cada uno de los observadores, aunque conservando su inclinación.

La simultaneidad es relativa. Primer hallazgo de Einstein. Pero incluso el orden temporal es relativo. El evento azul superior en Venus ocurre para *O* en un tiempo $t = 100$ segundos, unos veinte segundos antes que el evento naranja que ocurre en Mercurio. Sin embargo, para *O’*, el segundo de estos dos eventos, es decir, el de Mercurio, es unos veinte segundos anterior al de Venus. Como vimos el mes pasado, esta relatividad del orden temporal de eventos no da lugar a paradojas causales. Si hay ambigüedad en el orden temporal de dos eventos, uno no puede influir sobre el otro. La ambigüedad sólo ocurre entre puntos del espaciotiempo que no se pueden comunicar entre sí, o que podrían comunicarse sólo mediante señales más rápidas que la luz, lo cual es imposible en el marco de la relatividad especial.

Cuando se consideran eventos aleatorios, como la tirada de un dado, siguen sin darse paradojas causales, pero la relatividad del tiempo produce una sensación inquietante.







1. Varios eventos en el espaciotiempo tal y como los ven dos observadores con distintas velocidades. Las trayectorias de los dos observadores se muestran como líneas discontinuas en rojo y azul partiendo del origen. También se muestran los conos de luz de algunos de los eventos.

Hay una definición de pasado y futuro puramente causal: pasado es todo aquello que puede influirme y futuro es todo aquello sobre lo que puedo influir. Pero creo que el azar establece una diferencia más fuerte entre pasado y futuro. Supongamos que tiro un dado a las 12:00 del día 15 de junio y el resultado es un 6. Tenemos la sensación de que, con la tirada, ha habido algo parecido a una "creación". Antes de la tirada el resultado era completamente incierto, no existía. La diferencia entre antes y después de las 12:00 del 15 de junio no estriba sólo en los posibles efectos del resultado de la tirada. El resultado, 6, no estaba "escrito" en ningún sitio. Se "escribe", comienza a existir, cuando realizamos la tirada.

En el espaciotiempo newtoniano el azar tiene fácil cabida. El universo avanza como un todo a lo largo del tiempo. Podemos representar este avance tapando con una hoja de papel el diagrama de espaciotiempo y moviéndola hacia arriba. Los puntos tapados son puntos que aún no han ocurrido y los descubiertos son los que ya han ocurrido. Así fluye el tiempo newtoniano.

¿Se puede trasladar la noción "ha ocurrido" al espaciotiempo einsteiniano? Volviendo a la figura 1, supongamos que alguien lanza un dado en Mercurio en $t = 0$ (*punto inferior azul de la figura*) y envía el resultado mediante un rayo de luz hacia la Tierra. El observador *O* recibe la información en el punto en donde se cortan su trayectoria (*la línea azul punteada*) y el cono de luz que parte de Mercurio. Hace sus cálculos y concluye que la tirada *ocurrió* justo cuando él estaba en el punto verde. A pesar de que *O* recibe la información en $t = 300$ segundos, sólo puede recibirla si esta información se ha producido con anterioridad. Sin embargo, *O'*, quien también recibe el resultado, realiza el mismo tipo de argumento concluyendo que la tirada ocurrió en $t' = -100$ segundos. Que las dataciones de los dos observadores difieran no tiene nada de raro a estas alturas. Al fin y al cabo, *t* y *t'* son maneras de datar el *mismo* evento por parte de cada observador.

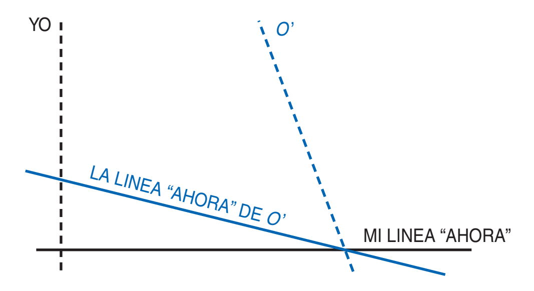
La cuestión se puede complicar un poco más. Supongamos dos tiradas de dado genuinamente aleatorias, que ocurren, respectivamente, en dos puntos A y B cuyo orden temporal es ambiguo. Para un observador *O*, la tirada A ocurre antes que la tirada B, mientras que para *O'* la B es anterior a la A. Es decir, *O* piensa que ha habido un universo en donde el resultado de A existía y el resultado de B no existía aún; mientras que *O'* pensará lo contrario. A pesar de que esta relatividad de lo que "ha ocurrido" no conduce a ninguna paradoja de causalidad, parece contradecir la sensación de que la historia del universo, en lo que se refiere a eventos aleatorios, "se escribe". En realidad este "se escribe" presupone ya la noción de que existe "un universo en un momento dado", lo cual contradice la teoría de la relatividad especial. No hay nada parecido a "el universo en tal o cual momento". Cualquier punto del espaciotiempo está en la línea "ahora" de algún observador suficientemente alejado.

En la figura 2 podemos ver esta situación de forma más explícita. La línea vertical es "mi historia", mi situación a lo largo del espaciotiempo. Muy alejado se encuentra otro observador, *O'*, que viaja hacia mí a una velocidad considerable. En la figura vemos mi línea "ahora" y la línea "ahora" de *O'*, que cruza mi historia, digamos, diez años más tarde que mi "ahora". Resulta entonces que, en mi "ahora", *O'* está pensando que los diez años siguientes de mi vida han ocurrido ya. La información de lo ocurrido en esos diez años le llegará mucho más tarde a *O'*, pero, cuando le llegue, concluirá que esos diez años ya habían ocurrido cuando él estaba en mi "ahora". Es decir, mis diez años siguientes están en cierto modo presentes en mi "ahora" a través de *O'*.

A diferencia del newtoniano, el espaciotiempo relativista parece implicar que "todo está escrito". Como decía Popper, el espaciotiempo einsteiniano se parece bastante a la cosmovisión de Parménides, para quien el tiempo era una ilusión. La cosmovisión opuesta, el "todo fluye" de Heráclito, que podríamos interpretar como "el futuro está por escribir", tiene una dudosa cabida en la relatividad especial, puesto que ni siquiera está claro qué entendemos por "futuro".

El filósofo Nuel Belnap desarrolló en un conocido artículo de 1992 una interesante teoría formal de ramificaciones en el espaciotiempo, pero sin aludir a ninguna clase de "escritura" paulatina de la historia del universo. En su teoría, los resultados de eventos aleatorios están ya "escritos" sobre el espaciotiempo ramificado.

Curiosamente, la cosmología relativista sí permite incluir la noción de un tiempo que fluye. Uno de sus puntos de partida, el llamado *principio cosmológico*, establece la existencia de ciertos observadores privilegiados, los llamados *observadores fundamentales*. Son observadores que se mueven igual que lo hacen, en media, las galaxias que están a su alrededor y definen una línea de tiempo común a todos ellos, el *tiempo cósmico*, y también una espacio "ahora" común. Por ejemplo, todos los puntos del espaciotiempo en los que la temperatura de la radiación de fondo es la misma definirían un espacio de simultaneidad universal. Sería entonces posible considerar que la historia del universo se está escribiendo, al igual que en el espaciotiempo newtoniano, como una sucesión de estas simultaneidades y existirían observadores (que no serían fundamentales) para los cuales su línea de "ahora" tendría puntos que aún no se han escrito, que aún no han ocurrido.



2. En mi "ahora", *O'* piensa que los próximos diez años mi vida "ya han ocurrido".

En cualquier caso, creo que la noción "ha ocurrido" es puramente filosófica. Quiero decir con ello que lo más probable es que no tenga consecuencias observables. Aun así, profundizar en las relaciones entre el espaciotiempo y el azar sí puede ser útil para una de las tareas pendientes de la física actual: conciliar la relatividad especial y general con la mecánica cuántica, en la que el azar desempeña un papel fundamental.

Mark Fischetti

FRUTOS SECOS

Cascanueces

¿Cómo se pelan industrialmente los frutos secos? Es algo que muchos lectores se preguntarán cada vez que bregan con una nuez o una almendra. A tenor de la variabilidad del tamaño y la forma de estos productos naturales, parece que el proceso deba entrañar notables dificultades técnicas.

A nosotros nos resulta estresante el esfuerzo de cascar una nuez lo justo para abrirla sin aplastar el bocado que guarda. Las plantas industriales, en cambio, procesan de 30 a 60 toneladas de frutos secos al día, sin quebrar más de una décima a un 1 por ciento.

En su mayoría, los frutos secos se recolectan mediante la sacudida de los árboles con una máquina parecida a un buldózer. Los preciados frutos se recogen del suelo con palas junto con tierra, hierbas, hojas, ramitas y piedras. Ese revoltijo se cierne con cedazos y cribas oscilantes para conseguir unas cargas de frutos secos limpias, que luego se clasifican por tamaño. Dada la variabilidad del mismo, en las plantas de procesado se disponen máquinas en paralelo, cada una de las cuales acepta uno de los tamaños especificados. Por ejemplo, en el caso de las almendras: para 13 milímetros de ancho, 14,5, 16, etcétera. Por regla general, las pacanas se criban a cinco intervalos de tamaño; los cacahuetes, a seis. Cuanto más se ajustan los tamaños, menos se daña la parte comestible.

Aunque hay una máquina para cada tipo de fruto, los procesos se basan en las mismas operaciones: cribado de impurezas, rotura y desprendimiento de cáscaras y arrastre por succión. Según los fabricantes, lo más importante es mantener limpio el flujo del producto.

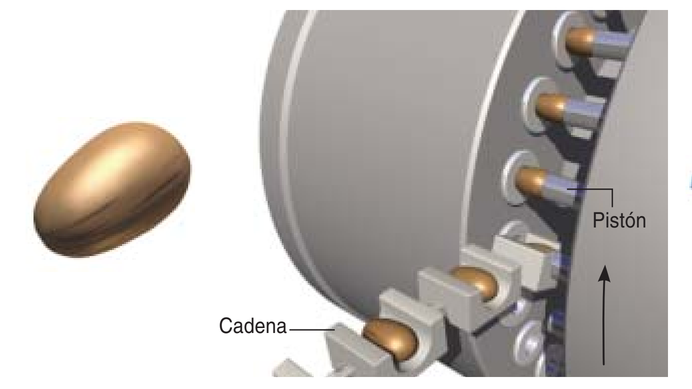
La evolución de la técnica ha sido lenta. La industria de la almendra, por ejemplo, ha adaptado gran parte de sus máquinas de la industria del cacahuete. Para cereales y alubias se emplean máquinas y procedimientos similares.

Algunos frutos secos plantean dificultades singulares. La cáscara de la nuez negra es tan dura, que requiere descascaradores especiales. Las nueces del Brasil son en realidad unas semillas que crecen en grupos de ocho a 24 dentro de unas vainas en forma de coco que también deben descascararse.



1. LOS FRUTOS SECOS DE CASCARA BLANDA, como las almendras, se separan de la cosecha en bruto y se clasifican por tamaños pasándolos por una sucesión de bateas perforadas. Los frutos de diámetro similar caen entre parejas de rodillos separados una distancia ligeramente inferior a ese tamaño. Un rodillo de 25 centímetros gira algo más rápido que el otro, ejerciendo un efecto de cizalla que parte la cáscara y la separa de la carne, o núcleo. Los cacahuetes, en cambio, se hacen pasar por unos orificios dotados de filos que separan las cáscaras por corte.

2. UNA MESA DE GRAVEDAD INCLINADA oscila a la vez que se impulsa aire a través del cedazo. El material se estratifica en un lecho fluidificado: los trozos de cáscara (poco densos) flotan hacia el extremo inferior y se descargan. Los núcleos, más pesados, se desplazan hacia el centro del cedazo. Las piedras (la parte más densa) suben hacia el extremo superior; un rastrillo las expulsa.



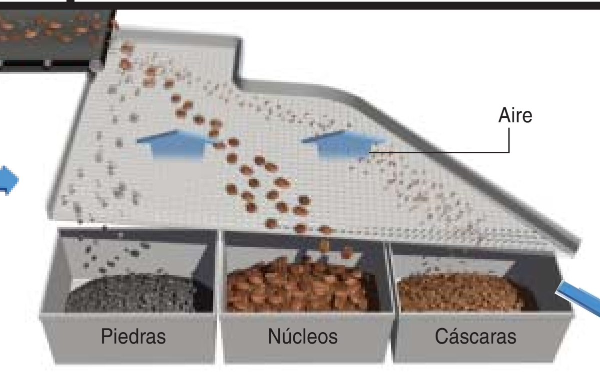
GEORGE RETSECK

¿SABIA USTED QUE...?

➤ GUARDESE EN LUGAR FRIO: En EE.UU. las cosechas alcanzan su apogeo en otoño, pero el proceso prosigue todo el año. Las almendras se almacenan de seis a ocho meses a una temperatura de cero a 15 grados centígrados antes de descascararlas. Las pacanas se guardan en congeladores durante dos o tres años; contienen un 80 por ciento de aceite, que se mantiene estable al congelarse.

➤ LA DESILUSION DE LAS ARDILLAS: El noventa por ciento de las avellanas estadounidenses se cultivan en Williamette Valley (Oregon). En el pasado, las cáscaras se quemaban como combustible; hoy se prefieren como mantillo. Dado que absorben muy poca humedad, las cáscaras se desecan muy rápidamente, si bien impiden que el sol seque la tierra que hay debajo; se descomponen lentamente. Son también densas, lo que impide la germinación de malas semillas. Pero el aroma trastorna a las ardillas, que no encuentran allí el manjar que esperaban.

➤ CASCAR NUECES DURAS: Gran parte de la producción mundial de anacardo se cultiva en India, Malasia, Indonesia y Africa Oriental. Cada uno crece sobre un pequeño pedúnculo periforme, un fruto falso. En los países pobres, los braceros suelen arrancar el fruto a mano. El aceite de la superficie de la cáscara es tóxico y corrosivo para la piel humana, por lo que el fruto se seca y tuesta para extraer el aceite y tornar quebradiza la cáscara. La mayoría de éstas se cascan a mano; los trabajadores se protegen los dedos con ceniza de madera o aceite de semilla de lino o de ricino. El uso de máquinas se está extendiendo de forma gradual.



3. LOS FRUTOS SECOS DE CASCARA DURA, como las pacanas (*ilustración*) y las avellanas, se sumergen durante tres a 12 minutos en agua a 88 grados centígrados, que los ablanda y pasteuriza. Al salir, la cáscara se endurece en cuestión de minutos, pero la carne mantiene la flexibilidad. Entonces, los recoge una cadena que hace pasar cada uno por un pistón, que golpea la cáscara a una presión de 2,5 a 3,2 kilos por centímetro cuadrado, cascándola; el núcleo queda intacto.

Haz láser

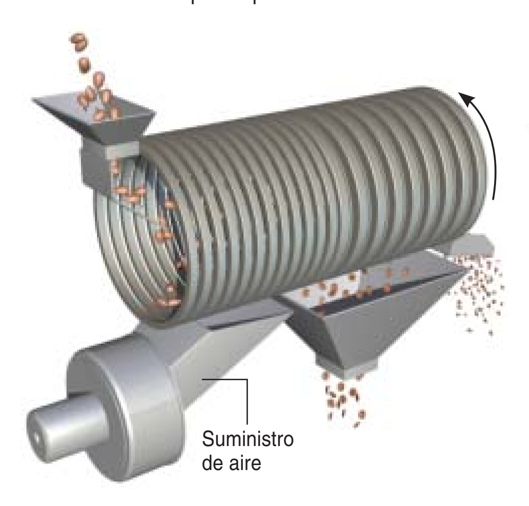
Haz infrarrojo

Pistolas de aire

Residuos

Núcleos

4. EL TAMBOR DE DESCASCARILLADO gira a la vez que se introducen los frutos cascados, que avanzan cilindro adelante por depresión. Los anillos desprenden las cáscaras por impacto.



5. EN LA MAYORIA DE LOS CASOS, los núcleos y las impurezas restantes caen a través de un escáner. Los haces de éste, infrarrojos o láser, se reflejan en los cuerpos delatando un tamaño escaso (núcleo roto) o un color indebido (núcleo podrido). Entonces, una pistola de aire se encarga de expulsar al sospechoso de la corriente principal, que es de un metro y veinte centímetros de ancho. Los operarios repasan los núcleos antes del envasado.

Hervé This

Parentescos culinarios

Para un cocinero, la salsa bearnesa y la crema inglesa pertenecen a reinos distintos: la primera es salada, la segunda dulce. En los libros de cocina, la bearnesa no aparece en la misma sección que la mayonesa: una es caliente y la otra fría. Sin embargo, estas tres preparaciones y muchas otras (salsa holandesa, crema pastelera, etcétera) se caracterizan por mostrar unas propiedades reológicas (el paso en boca o palatabilidad) parecidas; además, todas contienen huevo. ¿Sería la utilización de este ingrediente en una salsa un criterio para aproximar preparaciones en apariencia alejadas entre sí? Parece preferible tomar como norma la fisicoquímica de los sistemas dispersos, que, además, facilitaría la enseñanza de las técnicas culinarias. Para el epistemólogo Emile Meyerson, la ciencia no corresponde a la búsqueda de las causas, demasiado complejas y que se remontan demasiado atrás, sino a la búsqueda de las leyes o los mecanismos explicativos, pues son éstos los que ordenan el mundo.

La cocina necesita este tipo de simplificaciones. La "Guía culinaria" de Auguste Escoffier, por ejemplo, incluye más de 5000 recetas. En las salsas antes citadas, las proteínas del huevo desempeñan dos funciones fisicoquímicas. Por una parte, al desenrollarse por el efecto de cizalla que acompaña al batido de la salsa, disponen sus partes hidrófobas en contacto con gotas microscópicas de materia grasa; sus partes hidrófilas, al sumergirse en el agua, estabilizan las gotas de grasa formando una "emulsión". Cuando se calientan, las proteínas forman agregados coagulados microscópicos que se dispersan en el agua de la salsa, que se convierte entonces en una "suspensión sólida".

Estos sistemas dispersos constan de una fase continua y una fase dispersa; cada fase puede ser un gas, un líquido o un sólido. Ello nos lleva a los nueve tipos siguientes de sistemas simples:

Fase continua \ Fase dispersa	Gas	Líquido	Sólido
Gas	Gas	Aerosol	Aerosol sólido
Líquido	Espuma	Emulsión	Suspensión sólida
Sólido	Espuma sólida	Gel	Suspensión sólida

¿Permite esta clasificación describir el conjunto de las preparaciones culinarias? Casi, puesto que la mayoría de los platos corresponden a sistemas dispersos: las carnes, los pescados, las legumbres y las frutas están compuestos por una fase líquida (los fluidos intracelulares) dispersa en una matriz sólida (que se mantiene rígida por las membranas y paredes). Las salsas constituyen, en esencia, sistemas dispersos de tipo emulsión, suspensión o gel. Raros son los alimentos que no se encuentran en forma de sistema disperso. Si ello no fuera así, cada mordisco resultaría doloroso (imagine el lector la masticación de un cubito de hielo o de un gran cristal de azúcar).

Evidentemente, estas nueve clases de sistemas dispersos simples resultan insuficientes para describir todos los manjares, pues los ingredientes esconden a menudo una complejidad fisicoquímica mayor. Por ejemplo, la leche corresponde a una emulsión de gotitas de materia grasa en una solución acuosa, pero la fase continua contiene también micelas de caseína, agregados de proteínas cementadas por fosfato de calcio. Cuando se deja reposar la leche, la materia grasa asciende hasta flotar en la superficie y se obtiene la crema de leche, una emulsión concentrada que puede batirse.

Los sistemas de más de dos fases son muy numerosos. Para clasificarlos se deberá tener en cuenta qué fases dispersas se encuentran presentes en cada una de las fases básicas. Un puré de patatas, por ejemplo, se describe en primera aproximación como un conjunto de celdas dispersas en una emulsión. Esta consta de la materia grasa de la leche y la mantequilla fundida, dispersas ambas en el agua de la leche. Las propias celdas son análogas a vesículas acuosas, en las que los granos de almidón, hinchados por la cocción de la patata, han generado un gel.

A partir de esta clasificación, el artista del gusto podrá hacer variaciones (añadir albahaca o quitar un poco de tomillo no cambiará la base fisicoquímica del plato) y tendremos sistematizadas las listas interminables de salsas. De este modo, todos los procesos que se aplican a un plato de una determinada categoría serán utilizables en todos los platos de la misma categoría. La carne, el pescado y las legumbres, que tienen la misma estructura fisicoquímica, pueden someterse al mismo tipo de cocciones: fritura, braseado, salteado o asado. Asimismo, ciertos ingredientes de las emulsiones podrán substituirse por otros.

La descripción de las preparaciones culinarias en términos de sistemas dispersos permite concebir nuevos platos. Pensemos, por ejemplo, en una nueva forma de preparar las verduras. Si se cuecen primero en un poco de agua y después se cortan finamente, se obtendrá una suspensión. Si una parte de esta suspensión se tritura añadiendo aceite de oliva, se obtendrá una emulsión en la cual las proteínas y los fosfolípidos de las membranas celulares servirán de tensoactivos, que estabilizarán las gotas de aceite; por poco que bata la emulsión, contendrá las burbujas características de una espuma. La mezcla de los dos coloides dará lugar a un coloide complejo que podrá gelificarse en toda la masa. En definitiva, ¿qué plato habremos preparado? ¿Qué gusto tendrá? El gusto será el que se haya decidido, en función de la hortaliza de base y de los aromatizantes utilizados. Si se emplean, por ejemplo, zanahorias, el nombre del plato podría ser "gel espumoso y emulsionado de suspensión de zanahorias" o, en honor del físico Irving Langmuir (1881-1957), pionero de los sistemas dispersos, "zanahorias a la Langmuir".

LIBROS

Renacimiento

Humanista y transgresor

NICOLAUS SCUTELLIUS, O.S.A., AS PSEUDO-PLETHO. THE SIXTEENTH-CENTURY TREATISE *PLETHO IN ARISTOTELEM* AND THE SCRIBE MICHAEL MARTINUS STELLA, por John Monfasani. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2005.
EUSTRATIUS, ASPASIUS, MICHAEL EPHESIUS ET AL.: *ARISTOTELIS STAGIRITAE MORALIA NICHOMACHIA*. Traducción al latín de Johannes Bernardus Felicianus. Introducción de David A. Lines. Frommann-Holzboog; Stuttgart-Bad Cannstatt, 2006.

BOOK USE, BOOK THEORY: 1500-1700, por Bradin Cormack y Carla Mazzio. University of Chicago Library, 2005.

COPERNICUS'S ORIGINALITY. TOWARDS INTEGRATION OF CONTEMPORARY COPERNICAN STUDIES, por Michal Kokowski. Wydawnictwa Ihn Pan; Varsovia, 2004.

JEAN FERNEL'S *ON THE HIDDEN CAUSES OF THINGS*. FORM, SOULS AND OCCULT DISEASES IN RENAISSANCE MEDICINE, por John M. Forrester y John Henry. Brill; Leiden-Boston, 2005.

El Renacimiento humanista corona su apogeo en el cuarto decenio del siglo XVI. En 1543 aparecen el tratado copernicano *De revolutionibus orbium coelestium* y el vesaliano *De humani corporis fabrica*; un año antes, *De historia stirpium*, de Leonhart Fuchs, que inició el camino de un saber naturalista basado en la observación, motor del descubrimiento de nuevas tierras y nuevos mares. En 1542 también, Jean Fernel (*ca*. 1497-1558) da a conocer su *De abditis rerum causis* (*Jean Fernel's* On the Hidden Causes of Things. *Form, Souls and Occult Diseases in Renaissance Medicine*). Pese a las proclamas en contra, el humanismo no corta del todo con la tradición medieval. El movimiento se inicia con la recuperación, depuración y traslación de clásicos griegos, helenistas y bizantinos, "expurgados de barbarismos arabizantes y escolásticos". Paso éste obligado para su asimilación y criba.

La fiebre por la adquisición de nuevos manuscritos perdura hasta bien entrado el siglo XVI (*Nicolaus Scutellius, O.S.A., as Pseudo-Pletho y Eustratius, Aspasius, Michael Ephesius et al.:* Aristotelis Stagiritae Moralia Nichomachia). El mecenazgo civil y pontificio facilita la nueva figura del científico cortesano, al tiempo que la imprenta posibilita la difusión y democratización del conocimiento (*Book Use, Book Theory*). Lejos del carácter decorativo, de signo de poder, que acompañaba a la posesión de los códices, el libro adquiere una dimensión práctica, de innovación y progreso: *Usus libri, non lectio prudentes facit* ("el manejo del libro, no su lectura, lo que nos hace avisados"), escribe Geffrey Whitney.

En el campo de la filosofía, la apropiación de los clásicos se repartía entre los partidarios de Platón y los seguidores de Aristóteles, confrontación reflejada en *Pletho in Aristotelem*. Descubierto ese libro inicialmente en un manuscrito de la Biblioteca estatal de Múnich, se le confundió con una traducción inédita de la obra de Georgius Gemistus Pletho *De Differentiis Platonis et Aristotelis*. No había tal, sino una reelaboración y ampliación anónimas del tratado griego. ¿Quién fue el autor? Nicolaus Scutellius de Trento (1490-1542), del círculo de Giles de Viterbo. Tras recibir éste el capelo cardenalicio en 1518, Scutellius buscó su amparo para la traducción de textos neoplatónicos: *Theologia Platonica* de Proclo, su comentario al *Parmenides* de Platón, *De Iusto* del seudo-Platón y comentario de Pletho a los *Oracula Chaldaica*. Su actividad traductora se extendió al orfismo y otros movimientos herméticos.

Con *Pletho in Aristotelem*, Scutellius echa su cuarto a espadas en favor de Platón. Aunque el libro no lleva fecha, parece razonable suponer que lo escribiera mientras andaba en la traducción de textos neoplatónicos, entre comienzos del decenio de 1520 y el de 1530. Podría incluso haberlo escrito en reacción a la publicación de la *Comparatio Philosophorum Platonis et Aristotelis* de Georgius de Trebizond, en Viena en 1523.

Scutellius lista una serie de veinte puntos de desacuerdo entre Platón y Aristóteles. Indiquemos algunos de epistemología y filosofía natural: frente a las cuatro causas aristotélicas, los platónicos reconocen seis (eficiente, final, formal, material, instrumental y ejemplar); el sofista Aristóteles se extasiaba ante los ídolos de los sentidos, Platón abogaba por las ideas supremas y verdaderas; en su *Perihermeneias*, Aristóteles dice que el discurso es por convención, mientras que Sócrates en el *Cratilo* dice que es por naturaleza; para Aristóteles la ciencia es demostrativa, para Platón rememorativa; Aristóteles situaba las ideas en nosotros, Platón en el arquitecto; Aristóteles llamó al alma perfección del cuerpo (entelequia), mientras que Platón la denominó número que se mueve por sí mismo; Aristóteles rechazaba el infinito, Platón constituyó una tríada a partir de lo infinito y lo finito; Aristóteles hizo eterno al mundo, Platón temporal; Aristóteles rechazaba la opinión platónica expuesta en el *Timeo* de que la visión era una luz que emanaba del ojo.

El aristotelismo daba por supuesta la existencia de un orden natural. Los fenómenos que estudiaba eran regularidades de la vida diaria: el fuego calienta, los animales se re-

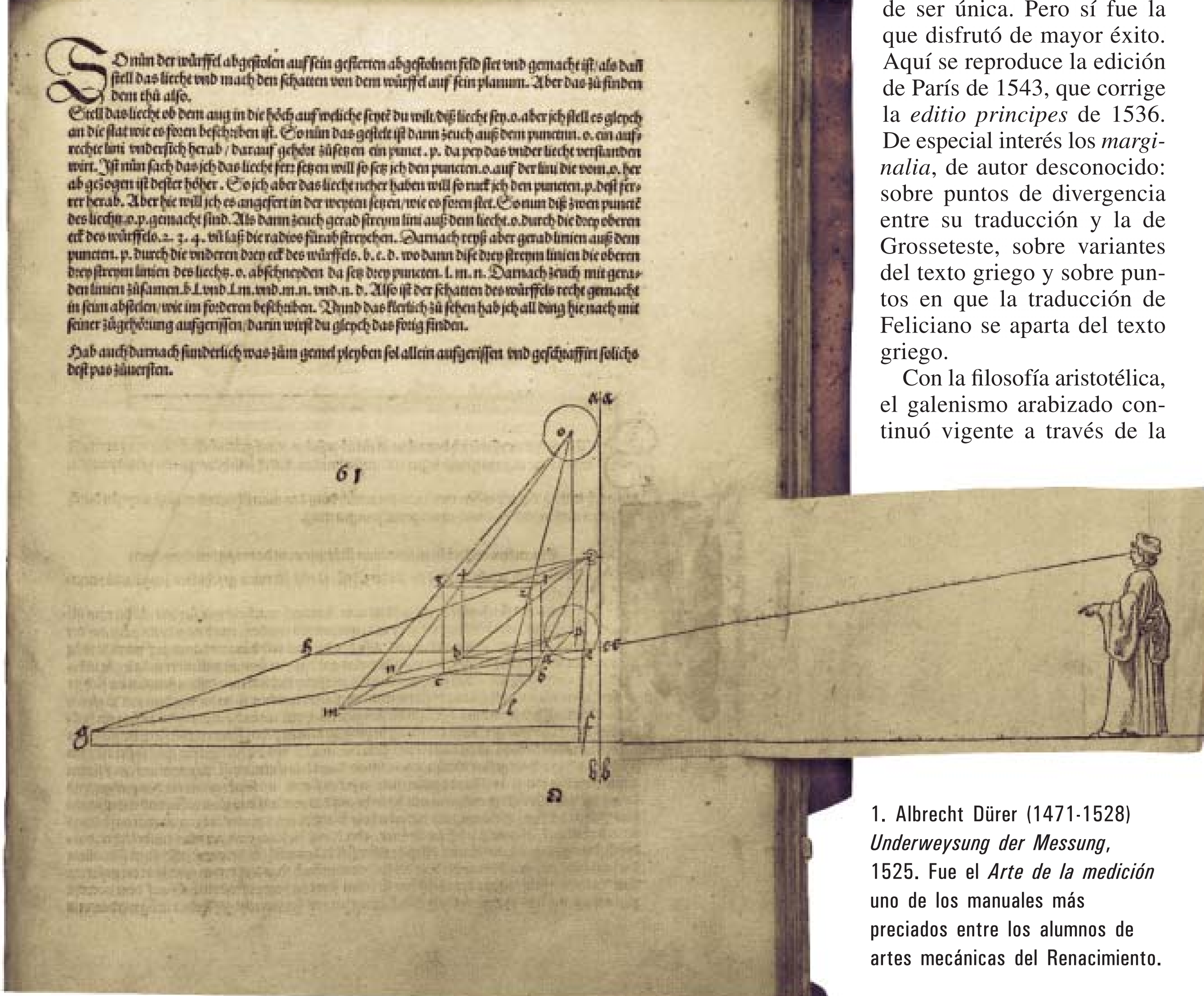
producen de acuerdo con su especie, el exceso daña a los sentidos. Competía a la filosofía natural entender ese orden, cuyo secreto último yacía en el tránsito de lo que estaba en potencia a su realización. Ese orden natural encontraba su extensión en la ética (*Eustratius, Aspasius, Michael Ephesius et al.:* Aristotelis Stagiritae Moralia Nichomachia). De Giovanni Bernardo Feliciano (1490-1552), su traductor y compilador, nos han llegado escasos datos biográficos. Procedía del norte de Italia y pasó buena parte de su vida en Venecia o aledaños. Tradujo obras de Demóstenes, Galeno, Paulo de Egina, Alejandro de Afrodisias, Dexippus, Porfirio y Ammonio. Por encima de todos, merece destacarse su traducción de la *Etica Nicomáquea* de Aristóteles con los comentarios griegos a la misma.

¿Quiénes eran los comentaristas? Debemos a Aspasio (s. II d.C.) una de las primeras exégesis de la *Etica Nicomáquea*. Alejandro de Afrodisias (*fl. ca.* 200 d.C.) escribió, o quizás inspiró, el tratado *Sobre problemas éticos*: problemas y soluciones sobre ética, donde se analizan diversos pasajes de la *Etica Nicomáquea*. Eustratio de Nicea (*ca.* 1050 *ca.* 1120) escribió un comentario sobre los libros I y VI de la *Etica Nicomáquea*; reduce la argumentación aristotélica a silogismos formales. Miguel de Efeso (*fl.* primera mitad del siglo XII) combina, en su comentario, el análisis textual con la lucubración filosófica.

Por ese mismo período medieval aparece en Constantinopla una compilación de comentarios griegos tejida con textos de Eustratius de Nicea (libros I y VI), un comentarista anónimo del siglo II (libros II-V), otro comentarista anónimo (libro VII), Aspasio (libro VIII) y Miguel de Efeso (libros V, IX y X).

En tal compilación bizantina se inspiró la traducción latina de Robert Grosseteste, que se fecha en torno a 1253 y llamada a ejercer una poderosa influencia en el pensamiento moral del Medievo. Así fue como se convirtió en canónica la distinción de Eustratio entre ética, o estudio de lo que es bueno para los individuos, economía, que atañe al gobierno y relación familiares, y política, o la ética de las relaciones entre gobernantes y gobernados. Tres siglos más tarde, en 1541, Giovanni Battista Feliciano aportaba una nueva traducción latina de los comentarios griegos sobre la *Etica Nicomáquea*. La obra conoció numerosas ediciones, la tercera de las cuales aparece aquí en facsímil. Desplazó a la traducción y compilación de Grosseteste. La traducción de Feliciano distaba mucho de ser única. Pero sí fue la que disfrutó de mayor éxito. Aquí se reproduce la edición de París de 1543, que corrige la *editio principes* de 1536. De especial interés los *marginalia*, de autor desconocido: sobre puntos de divergencia entre su traducción y la de Grosseteste, sobre variantes del texto griego y sobre puntos en que la traducción de Feliciano se aparta del texto griego.

Con la filosofía aristotélica, el galenismo arabizado continuó vigente a través de la



So nun der würffel abgestolen auff sein gefierten abgestolnen feld stet vnd gemacht ist/ als dann stell das liecht vnd mach den schatten von dem würffel auff sein planum. Aber das zu finden dem thu also.

Stell das liecht ob dem aug in die höch auff welche seyt du wilt/ diß liecht sey .o. aber ich stell es gleych an die stat wie es foren beschriben ist. So nun das gestelt ist dann zeuch auß dem puncten .o. ein auffrechte lini vndersich herab/ darauff gehört zu setzen ein punct .p. da pey das vnder liecht verstanden wirt. Ist nun sach das ich das liecht ferr setzen will so setz ich den puncten .o. auff der lini die vom .o. her ab gezogen ist dester höher. So ich aber das liecht neher haben will so ruck ich den puncten .p. dest ferrer herab. Aber hie will ich es angefert in der weyten setzen/ wie es foren stet. So nun diß zwen punct des liechts .o.p. gemacht sind. Als dann zeuch gerad streym lini auß dem liecht .o. durch die drey oberen eck des würffels .2. 3. 4. vnd laß die radios fürab streychen. Darnach reyß aber gerad linien auß dem puncten .p. durch die vnderen drey eck des würffels .b.c.d. wo dann dise drey streym linien die oberen drey streym linien des liechts .o. abschneyden da setz drey puncten .l.m.n. Darnach zeuch mit geraden linien zusamen .b.l. vnd .l.m. vnd .m.n. vnd .n.d. Also ist der schatten des würffels recht gemacht in seim absehen/ wie im forderen beschriben. Vnnd das klerlich zu sehen hab ich all ding hie nach mit seiner zugehörung auffgerissen/ darin wirst du gleych das forig finden.

Hab auch darnach sunderlich was zum gemel pleyben sol allein auffgerissen vnd geschaffirt solichs dest pas zu uersten.

1. Albrecht Dürer (1471-1528) *Underweysung der Messung*, 1525. Fue el *Arte de la medición* uno de los manuales más preciados entre los alumnos de artes mecánicas del Renacimiento.

impresión de las traducciones latinas de Avicena y Rasis. Y del *Conciliator* de Pietro d'Abano. Se trataba, esquematizado, de un corpus médico, con una vertiente eminentemente práctica, articulado en *quaestiones* y comentarios de acuerdo con los métodos expositivos del aristotelismo escolástico que se enseñaban en las universidades. El médico galenista tradicional buscaba restablecer el equilibrio de las cualidades, o temperamentos, dentro del cuerpo. Las cualidades contrarias de calor y frío, húmedo y seco expresadas en los cuatro humores corporales (sangre, flema, bilis negra y bilis amarilla) se equilibraban en una persona sana, pero cuando se perdía el equilibrio, aparecía la enfermedad. De ese modo, la fiebre se atribuía a un exceso de calor, y el médico tenía que enfriar el cuerpo: ya fuera liberando algo de humor cálido (sangre) o administrando "hierbas" enfriantes.

El único autor del siglo XVI, amén de Paracelso, que desarrolló una nueva teoría de la enfermedad, fue Jean Fernel, médico de Enrique II de Francia. Se propuso romper con el corsé de la filosofía natural recibida del galenismo, a través de una revisión del papel de las cualidades y fuerzas ocultas en los procesos biológicos, en particular en la generación y en las enfermedades contagiosas y pestilentes. En vísperas de la Revolución Científica, el *De abditis rerum causis* nos ofrece una visión particular, muy influyente, de las relaciones entre la filosofía y la medicina.

Nacido en Montdidier, en los aledaños de París, hasta los 27 años no empezó a estudiar medicina. De su inquietud científica previa nos ha dejado un tratado sobre las proporciones (*Monalosphaerium*, 1527) y otro de cosmografía (*Cosmotheoria*, 1528), que describe la forma y el tamaño de la Tierra, con la determinación de un grado de latitud.

En 1538 tenía ya terminado el *De abditis rerum causis*, donde anuda las relaciones entre medicina y filosofía a través de un diálogo entre tres interlocutores en torno a las enfermedades ocultas y sus causas. Eudoxo, el alias de Fernel, expone la doctrina de las "enfermedades de la sustancia total"; los otros interlocutores son Philiatros y Bruto, este último el alquimista ejerciente. La doctrina sobre las "enfermedades ocultas" resulta clave para entender lo que él denominaba "sustancia total" de la enfermedad. En el marco del galenismo, los humores son perceptibles para los sentidos. Pero hay componentes de la naturaleza humana que no lo son. Estos abarcan potencias y cualidades ocultas (incluidas las cualidades de primer grado) y los tres espíritus de la medicina galénica (animal, vital y natural). De una cualidad oculta conocemos sólo sus efectos a través de los sentidos, no las causas. Las cualidades ocultas se llamaban así en contraposición a las cualidades manifiestas, es decir, en oposición a las cualidades primarias (calor y frío, seco y húmedo). Ejemplo clásico de las cualidades ocultas era el magnetismo. Muchos medicamentos operaban en razón de sus cualidades manifiestas; otros, en cambio, sanaban sin que se supiera por qué, lo mismo que el magnetismo.

La obra eximia de Fernel fue el manual *Universa medicina* (1554). Se divide en tres partes principales: fisiología, patología y terapéutica. La fisiología no había alcanzado todavía el significado hoy asignado de disciplina que estudia las funciones de los seres vivos y apenas si trascendía el campo de la anatomía con nociones de física o filosofía natural. En la segunda parte, dedicada a la patología, ofrecía una exposición de los órganos humanos en estado morboso. La terapéutica se ocupaba de los medicamentos. En *De abditis*, que se incluyó en *Universa medicina*, alude a tres tipos de enfermedades ocultas: "ponzoñosas, contagiosas y pestilentes". Rechazaba que esas tres clases fueran resultado de la *dyscrasia*, del desequilibrio destructivo del temperamento normal. Y aportaba su propia explicación alternativa. Para Fernel, estas enfermedades no actuaban sobre los humores, sino sobre la forma sustancial del cuerpo, la sustancia total.

La calidad de las obras astronómicas traducidas al latín puso al descubierto las limitaciones de los textos al uso desde el Medievo. El primero en proponerse llenar ese vacío había sido John de Holywood ("Sacrobosco"), autor de un *Tractatus de sphaera*. Constaba éste de cuatro libros, donde exponía la esfericidad del cosmos y de la Tierra, la eclíptica, el zodiaco, orto y ocaso de los cuerpos celestes, longitud del día y la noche, los siete "climas" y el movimiento planetario. La *Esfera* de Sacrobosco resultaba insuficiente. Aparecieron libros que abarcaban teoría y cálculos planetarios más avanzados, como la *Theorica planetarum*, que explicaba las construcciones ptolemaicas básicas, y los *Canones* (reglas) que acompañaban las tablas alfonsinas y toledanas. *Sphaera*, *Theorica* y *Canones* formaron el núcleo de la enseñanza astronómica de la Edad Media latina. Viena, en el siglo XV, se convierte en centro reformador con Georg Peurbach y Johannes Muller de Königsberg ("Regiomontano"). La *Epitome del Almagesto* de Regiomontano, impresa en 1496, culmina la astronomía humanista.

Modelos geométricos y tablas para el cálculo de los movimientos planetarios centran el *Almagesto* de Ptolomeo, que recoge observaciones entre el 127 y el 141 d.C.; se llamaba *Megale syntaxis* o *Compilación matemática*, conocida también por *Gran Compilación*, que los astrónomos árabes tradujeron en *al-majisti* ("la mayor"), latinizada por los medievales en *Almagestum*. Basaba los modelos en los círculos excéntricos, los epiciclos y el ecuante. (El ecuante viene a ser la imagen especular de la Tierra y se halla en el lado opuesto del centro de la Tierra y a igual distancia del deferente.) Añadía un catálogo de un millar de estrellas dispuestas en 48 constelaciones, con la longitud, latitud y brillo aparente de cada una de ellas. Más tarde, revisó las tablas y compiló el *Almagesto* en las *Hipótesis planetarias*, donde agregó la dimensión física a la modelización geométrica. En las *Hipótesis planetarias*, introdujo la noción de distancias planetarias con la ayuda de la idea aristotélica de la contigüidad de las esferas planetarias. Para Ptolomeo la teoría no sólo tenía un carácter instrumental, sino que describía también un espacio físico.

Los astrónomos de la escuela de Maragha introdujeron el mecanismo de Tusi, que permitía eliminar el ecuante de la teoría primaria de Ptolomeo. Juan de Buridan y sus discípulos Nicolás de Oresme y Alberto de Sajonia, junto con Nicolás de Cusa desarrollaron una nueva física



2. *Copernicus's conversation with God* (1873). Obra del pintor polaco Jan Matejko (1838-1893). Cortesía del Museo de la Universidad Jagielloniana.

(filosofía natural) y cosmología, especialmente una teoría del movimiento (impetus), una teoría de la gravedad y argumentos sobre la posibilidad del movimiento diurno de la Tierra, con lo que se daba un adelanto significativo sobre la física de Aristóteles.

Con Nicolás Copérnico (1473-1543) cae el sistema ptolemaico y comienza la astronomía moderna. Tras una primera instrucción filosófica y astronómica en Cracovia, marcha a Italia, para cursar derecho en Bolonia y medicina en Padua (*Copernicus's Originality. Towards Integration of Contemporary Copernican Studies*). Su teoría heliocéntrica ("in medio vero omnium residet Sol") aparece esbozada en el *Commentariolus*, escrito antes de 1514, y desarrollada plenamente en el *De revolutionibus orbium coelestium libri VI* (1543). Aquél reflejaba su insatisfacción con los ecuantes e introducía el heliocentrismo en siete postulados. Con el *De revolutionbus* satisface dos propósitos complementarios. En el libro primero demostró las consecuencias de la proposición según la cual la Tierra era un planeta en órbita alrededor del Sol. Los libros restantes se proponen demostrar que podían calcularse tablas adecuadas a partir de modelos geométricos con el Sol en el centro.

¿Fue Copérnico un autor original? ¿Poseía fuste innovador o se limitó a recoger lo que otros habían sembrado? ¿Cuál fue la génesis, naturaleza y recepción de la astronomía copernicana? Michal Kokowski apuesta por la originalidad de Copérnico en astronomía, matemática y física, cuestionada a menudo. Funda su defensa en la demostración copernicana del movimiento de la Tierra y en la exposición de los modelos matemáticos de fenómenos astronómicos aportados en el *Commentariolus* y en el *De revolutionibus*, comparados con modelos análogos inventados por astrónomos islámicos medievales.

Desde una óptica epistemológica, Imre Lakatos y Elie Zahar, Michael Heidelberger, Larry Laudan, Clarc Glymour, Martin V. Curd, Ernan McMullin, Michal Kokowski y Noel M. Swerdlow razonan que, para Copérnico, su teoría era objetivamente mejor que la de Ptolomeo y una descripción verdadera del mundo. Se fundaban, entre otros motivos, en argumentos de armonía, simetría y unificación del sistema, en la correlación entre el período heliocéntrico del planeta (período del movimiento en torno al Sol) y distancia entre el planeta y el Sol. En esa época la armonía o estética a la que apelaba el autor en la *Carta dedicatoria al Papa Paulo III* incluida en el *De revolutionibus* constituía un recurso retórico más. Téngase en cuenta que, habiendo recibido una sólida formación en lógica y dialéctica, no argumentaba con las técnicas silogísticas aristotélicas al uso, sino que prefería la dialéctica, la lógica de la conjetura y las proposiciones condicionales hipotéticas.

A corto plazo, los modelos planetarios de Ptolomeo y Copérnico son aproximada y observacionalmente equivalentes, pero no son equivalentes en un sentido exacto y geométrico. Tal disparidad se debía a que Copérnico sustituyó el círculo ecuante por el par de Tusi. Aunque cometiera errores en sus cálculos, nadie le discutirá la invención de un mecanismo lunar reformado o la demostración del cambio experimentado, andando el tiempo, por las ápsides. En *De revolutionibus* Copérnico aplicó una clasificación tripartita de enunciados en torno a la Naturaleza: ciertos, probables e inciertos. Enunciados ciertos eran: "La Tierra, encerrada entre los polos, presenta una superficie esférica"; "La cantidad de agua no puede decuplicar el volumen de tierra"; "La demostración puramente geométrica no puede determinar el lugar del Universo"; "La Tierra se mueve con un triple movimiento". Un enunciado probable, que corresponde al nivel de filosofía natural cualitativa, era el siguiente: "La Tierra ejecuta un movimiento diario". Con mayor rigor, esta hipótesis era más probable que esta otra: "La Tierra permanece en reposo durante el movimiento diario de la esfera de las estrellas fijas". Por último, para Copérnico era un problema incierto "si el universo es finito o infinito".

—Luis Alonso

...DE JULIO 2006



LOS PRIMEROS MICROSEGUNDOS, por Michael Riordan y William A. Zajc

Se han realizado experimentos que reproducen las condiciones del universo naciente, con unos resultados sorprendentes.



DESACTIVAR LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER, por Michael S. Wolfe

La investigación reciente sugiere estrategias para bloquear los procesos moleculares que conducen a este trastorno neurodegenerativo.



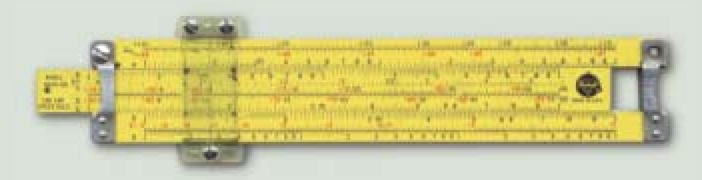
ORIGENES DE LA TEORIA DE NUDOS, por Daniel S. Silver

El estudio de los nudos surgió del empeño de tres físicos escoceses en la aplicación de la teoría de nudos a cuestiones fundamentales sobre el universo.



HISTORIA DE LA REGLA DE CALCULO, por Cliff Stoll

Antes de la llegada de las calculadoras electrónicas, científicos e ingenieros se servían de la regla de cálculo.



EL NACIMIENTO DEL AMAZONAS, por Carina Hoorn

A través del estudio de la formación del mayor río del mundo nos es dado conocer las razones de la extraordinaria abundancia de vida vegetal y animal en la pluviselva amazónica.

